SÉRIE A, N° 4116
N° D'ORDRE
4967

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS-SCIENCES PHYSIQUES

PAR

Mohsen ALAVI-NEJAD

PREMIÈRE THÈSE

L'épaisseur d'eau condensable de l'atmosphère et sa variation diurne

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenue le 14 juin 1963, devant la commission d'examen

MM.	E. VASSY	Président
	J. BRICARD	Examinateurs
	J. DELLOUE	Examinateurs
Mme	A. VASSY	(Invitée)

SÉRIE A, N° 4116
N° D'ORDRE
4967

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS-SCIENCES PHYSIQUES

PAR

Mohsen ALAVI-NEJAD

PREMIÈRE THÈSE

L'épaisseur d'eau condensable de l'atmosphère et sa variation diurne

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenue le 14 juin 1963, devant la commission d'examen

MM.	E. VASSY	Président
	J. BRICARD	Examinateurs
	J. DELLOUE	Examinateurs
Mme	A. VASSY	(Invitée)

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

PROFESSEURS

Doyen ..... ZAMANSKY

G. JULIA	T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure
PRENANT	T	Anatomie et Histologie comparée
GRASSE	T	Evolution des êtres organisés
PREVOST	T	Chimie organique
WYART	T	Minéralogie et Cristallogr.
TEISSIER	T	Zoologie
MANGENOT	T	Biologie végétale (Orsay)
P. AUGER	T	Physique quantique et relativité
MONNIER	T	Physiologie des Fonctions
PIVETEAU	T	Paléontologie
ROCARD	T	Physique (E.N.S.)
CARTAN	T	Mathématiques (E.N.S.)
LAFFITTE	T	Chimie Générale
FAVARD	T	Géométrie supérieure
COULOMB	T	Physique du Globe
Mlle COUSIN	T	Biologie
CHRETIEN	T	Chimie minérale
DRACH	T	Zoologie
KASTLER	T	Physique (E.N.S.)
EPHRUSSI	T	Génétique
RIVIERE	T	Géologie (Orsay)
GAUTHERET	T	Biologie (PCB)
R. LUCAS	T	Recherches Physiques
A. THOMAS	T	Biol. cellulaire
ARNULF	T	Optique appliquée
M. MORAND	T	Physique Enseignement
SOLEILLET	T	Physique (P.C.B.)
FORTIER	T	Mécanique expérimentale des fluides
DANJON	T	Astronomie
PETIT	T	Biologie maritime
QUENEY	T	Météorologie et dynamique atmosphérique
GALLIEN	T	Embryologie
EICHHORN	T	Biologie végétale (P.C.B.)
DE CUGNAC	T	Biologie végétale (S.P.C.N.)
Mlle CAUCHOIS	T	Chimie Physique
THELLIER	T	Physique du Globe
L'HERITIER	T	Biologie Générale (Orsay)
GRIVET	T	Radioélectricité (Orsay)
PONCIN	T	Mécanique générale
DUBREIL	T	Arithmétique et théorie des nombres
QUELET	T	Chimie organique
CAGNIARD	T	Géophysique appliquée
CHAMPETIER	T	Chimie macromolécul.
CUVILLIER	T	Micropaléontologie
JUNG	T	Pétrographie
TRILLAT	T	Microscopie et diffract. électronique
WIEMANN	T	Chimie organique et structurale
JACQUINOT	T	Spectroscopie (Orsay)
VASSY	T	Physique de l'atmosphère
DESTOUCHES	T	Théories physiques
AMIEL	T	Chimie des solides
HOCART	T	Minéralogie et Cristallogr.
J.P. MATHIEU	T	Recherches Physiques
COUTEAUX	T	Biol. animale (PCB)
MAY	T	Zoologie (Orsay)
CHOQUET	T	Théor. des fonctions et Topologie
FELDMANN	T	Biol. végétale (P.C.B.)
GUINIER	T	Physique des solides (Orsay)
JOST	T	Physiologie comparée
FORTET	T	Calcul des Probabilités
SCHWARTZ	T	Calc. diff. et Intégr.
CHOUARD	T	Physiologie végétale
MALAVARD	T	Aviation (Techn. Aéronaut.)
BRELOT	T	Calcul différentiel
NORMANT	T	Synthèse organique générale
BENARD	T	Chimie (E.N.S.C.P.)
BUVAT	T	Botanique (E.N.S.)
DUGUE	T	Statistiques mathém.
SOULAIRAC	T	Psychophysiologie
ULRICH	T	Physiologie végétale (E.N.S.)
MARECHAL	T	Optique théorique et appliquée
KIRRMANN	T	Théories chimiques
CHADEFAUD	T	Botanique
Mlle LE BRETON	T	Physiologie
SALEM	T	Mathématiques générales
LELONG	T	Mathématiques générales
DEVILLERS	T	Anatomie et Histol. comparées
EHRESMANN	T	Topologie algébrique
FRANÇON	T	Physique (S.P.C.N.)
GLANGEAUD	T	Géogr. physique et Géologie dynamique
GODEMENT	T	Mathématiques (M.P.C.)
PISOT	T	Calcul des Probabilités
ROCH	T	Géologie
SCHATZMANN	T	Astrophysique
TERMIER	T	Paléontologie stratigraphique
ZAMANSKY	T	Mathématiques générales
LENNUIER	T	Physique (P.C.B.)
RIZET	T	Génétique (Orsay)
ROUTHIER	T	Géologie appliquée
Mme TONNELAT	T	Relativité
DIXMIER	T	Mathématiques (MPC)
SOUCHAY	T	Chimie (P.C.B.)
AIGRAIN	T	Electrotechn. générale
BRUSSET		Chimie minérale
M. LEVY	T	Physique théorique des hautes énergies (Orsay)
Mme CHAIX	T	Chimie biologique
Mme HUREL-PY		Biol. vég. (P.C.B.)
PIAUX	T	Chimie (S.P.C.N.)
BRUN	T	Mécanique exper. des Fluides
LEDERER	T	Chimie biologique
Mme DUBREIL	T	Mathématiques (Agrég.)
Mme LELONG	T	Mathem. (E.N.S.)
BELLAIR	T	Géologie (S.P.C.N.)
COTTE	T	Physique (M.P.C.)
DUBOIS J.E.	T	Chimie (M.P.C.)
LAMOTTE	T	Zoologie (E.N.S.)
MICHEL André	T	Chimie Minérale (Orsay)
OLMER	T	Energétique Gle
ROUAULT	T	Physique
GAUTHIER	T	Mécanique appliquée
BARCHEWITZ	T	Chimie Physique
BROSSEL	T	Physique atomique
BUSER		Biologie animale (P.C.B.)
CAMUS		Biologie végétale (P.C.B.)
CASTAING	T	Physique (Orsay)
CURIEN	T	Minéralogie et cristallographie
MOYSE	T	Physiol. Vég. (Orsay)
NOIROT		Evolution des êtres organisés
PANNETIER	T	Chimie (Orsay)
POSSOMPES	T	Biologie animale (P.C.B.)
PULLMANN		Chimie théorique
TEILLAC	T	Physique nucléaire et radioactivité
TONNELAT		Biol. physico-chimique
VILLE	T	Econométrie
WILLEMART		Chimie (P.C.B.)
DODE	T	Chimie (Orsay)
FREYMANN	T	Physique (S.P.C.N.)
GUINOCHET	T	Biol. Vég. (Orsay)
ROLLET	T	Chimie (P.C.B.)
Mlle JOSIEN	T	Chimie (P.C.B.)
CHEVALLEY	T	Géométrie algébrique et théorie des groupes
ARNOULT	T	Electronique (Orsay)
CHAPELLE	T	Physique (Orsay)
DELANGE	T	Mathématiques (Orsay)
DENY	T	Mathématiques générales (Orsay)
GERMAIN	T	Mécanique théorique des fluides
LUCAS G.	T	Géologique
ALLARD	T	Chimie Physique
BERTHELOT	T	Physique fondamentale des Hautes Energies (Orsay)
BRICARD	T	Météorologie
Mme ALBE-FESSARD		Psychophysiol.
FRIEDEL		Physique des Solides (Orsay)
M. JULIA		Chimie Organ. Structurale
LENDER		Biol. Animale (S.P.C.N.) (Orsay)
MAGAT		Physico-chimie des Rayonnements
Mlle QUINTIN	T	Electrochimie
MONOD	T	Biochimie cellulaire
BENOIT	T	Physiologie animale (Orsay)
DE POSSEL	T	Analyse numérique
CHARLOT	T	Chimie analytique
LEMEE	T	Physiologie B.M.P.V. (Orsay)
GUERIN	T	Chimie (Orsay)
CHATELET M.		Chimie (P.C.B.)
JEAN		Physique (Orsay)
MATTLER	T	Physique (Orsay)
BERGERARD		Biol. Anim. (S.P.C.N.)(Orsay)
BERTEIN		Electronique (Orsay)
BOUISSIERES		Chimie des Radioéléments (Orsay)
Mme COUTURE		Thermodynamique et Mécanique Physique
ELLENBERGER		Géologie appliquée
FRANC		Biologie animale (P.C.B.)
SCHNELL		Botanique tropicale (Orsay)
STOLKOWSKI		Physiologie animale (P.C.B.)
ACHER		Chimie Biologique (Orsay)
BAUDOIN		Biologie
BEAUMONT		Biologie animale
BLAMONT		Géophysique Ionosphère
BOURREAU		Biologie Végétale S.P.C.N. (Orsay)
CURIE D.		Physique (M.G.P.)
DURAND-DELGA		Géologie
FREON		Chimie Organique (Orsay)
HELLER		Physiologie végétale
TORTRAT		Calcul des Probabilités
CAILLEUX		Géologie (S.P.C.N.)
MAGNAN	T	Physique (P.C.B.)
DAUDEL		Mécanique Ondulatoire appliquée à la chimie théorique et à la Physique Nucléaire
Mlle FOURCROY		Biologie Végétale (S.P.C.N.)
Mme CHOQUET-BRUHAT	T	Mécan. Analytique et méca. céleste.
Mlle VEIL		Physiologie Générale
LWOFF	T	Microbiologie
SIESTRUNCK	T	Mécanique physique et Expérimentale
LACOMBE	T	Métallurgie (Orsay)
BROCHARD	T	Physique P.C.B. (Orsay)
CABANNES	T	Mécanique générale
LESIEUR	T	Mathématiques M.P.C. (Orsay)
MAZET	T	Mécanique générale (Orsay)
CAIRE		Géographie phys. et Géolog. Dynamique
COMOLET	T	Mécanique des fluides
CORABOEUF		Physiologie animale Orsay
DELLOUE		Physique de l'exosphère
GORENFLOT		Botanique II (Orsay)
HOUILLON		Biologie animale PCB
JULLIEN J.		Chimie SPCN (Orsay)
MALGRANGE	T	Technique Math. de la Physique (Orsay)
OLIVIER		Antropologie
NOZERAN	T	Botanique II (Orsay)
BLANC-LAPIERRE	T	Physique ENS (Orsay)
CHEVAUGEON	T	Botanique (Orsay)
KAHANE	T	Mathématiques (Orsay)
SAMUEL	T	Mathémat. ENS féminines
KOURGANOFF	T	Astronomie (Orsay)
THIRY	T	Mécanique céleste
ABELES		Physique SPSCN
AMAT		Physique PCB
AUBOIN		Géologie
Mme BENOIT-GUEUTAL		Physique Nucl. et radioactivité
BOUGIS		Biologie marine (Villefranche/mer
BRUHAT	T	Mathématique MPC
BRUNN	T	Géologie historique (Orsay)
CHABBAL		Physique MGP (Orsay)
DEHEUVELS	T	Mathématique Propé (Orsay)
D'ESPAGNAT		Physique théorique (Orsay)
FURON		Géologie SPCN
Mme GANS	T	Génétique
GENEVES		Biologie végétale PCB
GUILBERT		Physique (CUS Orléans)
HUPE		Pétrographie
HOLLANDE	T	Biologie générale
LIONS	T	Analyse numérique
MAITTE		Chimie PCB
MEYER		Physique propédeutique
NICOLAS		Géologie appliquée
PANUGEL		Biologie générale
RAVIER		Pétrographie
ROSEAU	T	Mécanique théoriq. des Fluides
ROUBINE		Electronique
SILBER	T	Chimie P.C.B.
UEBERSFELD	T	Electronique
YVON	T	Théories Physiques.

Secrétaire général ..... R. POULLAIN

A mes parents

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549214_0043

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Physique de l'Atmosphère de la Faculté des Sciences de Paris.

Nous tenons à exprimer notre toute particulière reconnaissance à Monsieur le Professeur E. VASSY qui a bien voulu nous admettre dans le laboratoire qu'il dirige et qui s'est toujours vivement intéressé à notre travail.

Toute notre gratitude va également à Madame A. VASSY, Maître de Recherches au Centre National de la Recherche Scientifique, qui n'a cessé de nous prodiguer ses précieux conseils.

Nos vifs remerciements s'adressent également à Monsieur B. LEROY pour l'aide constante qu'il nous a apportée dans tous les domaines et à Monsieur l'Ingénieur P. BLOOM grâce à qui nous avons pu réaliser la partie électronique.

Nous sommes reconnaissant au Centre National d'Etudes Spatiales qui nous a accordé les moyens matériels nécessaires pour l'accomplissement de ce travail.

Nous n'oublions pas non plus tous nos camarades ainsi que le personnel du laboratoire auprès desquels nous avons toujours trouvé un appui efficace.

INTRODUCTION

La présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère suscite un intérêt tout particulier, tant au point de vue purement scientifique (teneur en eau, absorption par la vapeur d'eau, bilan radiatif) qu'en ce qui concerne les applications pratiques (radio-communications par propagation troposphérique, radio-astronomie). On sait que l'air contient de la vapeur d'eau, en quantité faible mais extrêmement variable, principalement concentrée dans les plus basses couches de l'atmosphère. Comme la vapeur d'eau présente de fortes bandes d'absorption dans le spectre visible et surtout dans l'infra-rouge, elle absorbe une partie du rayonnement solaire (direct ou diffusé par la surface de la Terre) et du rayonnement propre de notre planète.

La vapeur d'eau atmosphérique joue par suite un rôle important dans les relations entre les phénomènes solaires et terrestres [1]. Par exemple les échanges d'énergie dont dépend l'équilibre thermique de l'atmosphère sont fonction de la quantité de vapeur d'eau et sa répartition en altitude [2]. Les variations de l'indice de réfraction de l'air [3], l'absorption des ondes ultra courtes (hyperfréquence) [4] et la condensation de la vapeur d'eau au point de vue thermodynamique de l'atmosphère [5] sont les plus importants problèmes posés par les variations de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère.

Faute de données expérimentales suffisantes, tout au moins dans la stratosphère et dans la haute atmosphère, tous les calculs concernant les énergies absorbées, rayonnées ou diffusées doivent envisager différents cas extrêmes qui ne font qu'encadrer les conditions réelles existant dans l'atmosphère ; du moins ces calculs ont-ils pour résultat de traduire en chiffres l'importance de la présence de la vapeur d'eau [6]. On fait également jouer un rôle à la vapeur d'eau dans certains équilibres photochimiques : il importe donc d'avoir sur la vapeur d'eau atmosphérique, principalement sur ses variations, des données aussi complètes que possible.

L'EPAISSEUR D'EAU CONDENSABLE -

Pour connaître la quantité de vapeur d'eau présente dans la totalité de l'atmosphère au-dessus d'une station, ainsi que ses variations, nous mesurons l'épaisseur d'eau condensable. Si l'on considère dans l'atmosphère une région délimitée par un cylindre vertical, nous appelons "épaisseur d'eau condensable" l'épaisseur de la couche d'eau liquide que donnerait la vapeur d'eau contenue dans ce cylindre, supposée condensée et répartie uniformément sur une section droite. Il est à remarquer que l'eau existant déjà dans ce cylindre à l'état liquide ou solide n'est pas comprise dans cette définition. Nous mesurons cette épaisseur en centimètres ; elle correspond à la quantité définie par Fowle [7] sous le terme de "precipitable water".

A l'heure actuelle, les seules mesures courantes concernant la vapeur d'eau atmosphérique sont des mesures d'humidité relative. Si les mesures au niveau du sol sont faites de façon régulière et correcte grâce à des appa-

reils de types divers, il n'en est pas de même des mesures en altitude. On sait que la vapeur d'eau est presque entièrement concentrée au-dessous de 7 à 10 km (trosposphère) et bien entendu sa répartition est essentiellement variable. Ce résultat est confirmé par les prises d'air effectuées par ballons sondes dans la stratosphère et dans lesquels on n'a pas pu évaluer l'humidité relative, celle-ci étant très faible [8]. Une première tentative pour connaître l'épaisseur d'eau condensable a été faite par Hann [9] qui avait établi une formule empirique donnant l'épaisseur d'eau condensable en fonction de la pression partielle de la vapeur d'eau à l'altitude zéro ; cette formule avait été établie par le calcul en tenant compte des résultats obtenus par ballons sondes ou cerf-volants :

$$f_h = f_o \; 10^{-\frac{h}{6000}\left(1+\frac{h}{20000}\right)} \qquad (1)$$

où f_h est la pression partielle de la vapeur d'eau à l'altitude h,

f_o la pression de vapeur d'eau à l'altitude zéro, h étant exprimé en mètre .

Comme Fowle l'a montré par la suite, la formule de Hann a une valeur uniquement statistique ; on conçoit facilement que ce sont précisément les jours où la formule ne s'applique pas qu'il importe de connaître l'épaisseur d'eau condensable en vue de la prévision météorologique, en particulier dans les cas de superposition de masses d'air de caractères différents. Il fallait donc obtenir une mesure effective de l'épaisseur d'eau condensable de l'atmosphère.

Fowle [10], [11] en 1910 fut le premier à effectuer cette mesure par une méthode spectrophotométrique : il mesurait au moyen du bolomètre l'énergie solaire transmise par l'atmosphère dans les bandes d'absorptions ψ et Ψ de la vapeur d'eau, un étalonnage préalable permettant de transformer les indications du bolomètre en épaisseur d'eau condensable. La question de la mesure de l'épaisseur d'eau condensable a été poursuivie par la Smithsonien Institution qui a mis au point un appareil en 1930, appareil qui comporte entre autre un spectrobolomètre et un pyrehéliomètre : cet instrument donne l'épaisseur d'eau condensable, la luminance du ciel et l'intensité totale du rayonnement solaire. En 1940 A. et E. Vassy [12] ont réalisé un instrument à lecture directe basé sur les propriétés absorbantes de la vapeur d'eau utilisant toujours le Soleil comme source de lumière mais fonctionnant dans le proche infra-rouge où certaines cellules photoélectriques sont sensibles. Puis un appareil analogue a été réalisé aux Etats-Unis [13]. La seule différence consistant dans le fait que la mesure de l'énergie solaire dans la région où la vapeur d'eau n'absorbe pas est 10130 A° au lieu de 8600 A°. Ultérieurement en 1954 A. et E. Vassy [14] ont mis au point un appareil plus précis à deux faisceaux permettant de mieux saisir les variations rapides de la vapeur d'eau.

Nous avons réalisé un nouvel appareil [15] basé sur le même principe : notre but a été d'abord de le rendre plus sensible afin de pouvoir utiliser la Lune comme source lumineuse, ensuite de pouvoir travailler avec le même instrument sur le Soleil pendant la journée et sur la Lune pendant la nuit, de manière à étudier le cycle complet des phénomènes de condensation de la vapeur d'eau pendant une période de 24 heures. En tenant compte du maximum de l'éclairement du Soleil (150,000 Lux) [16] et de la Lune (0,2 Lux) [17] ce qui donne un rapport de $7,5.10^5$ on voit que ce problème comportait de sérieuses difficultés. L'instrument réalisé est basé sur les propriétés absorbantes de la vapeur d'eau dans la région infra-rouge des bandes ρ, σ, τ ; nous donnerons dans le premier chapitre le principe détaillé de l'appareil et sa réalisation puis nous indiquerons le procédé d'étalonnage, enfin au dernier chapitre, nous exposerons les résultats obtenus.

CHAPITRE I

RÉALISATION DE L'APPAREIL

I - PRINCIPE -

Pour mesurer l'épaisseur réduite d'eau condensable contenue dans l'atmosphère on isole dans le spectre de la lumière solaire une région subissant l'absorption par la vapeur d'eau à l'exclusion des autres constituants de l'atmosphère : l'énergie reçue sera alors fonction de l'épaisseur d'eau condensable mais d'autres causes d'absorption se superposeront à celle-ci : l'absorption par diffusion moléculaire fonction de la longueur d'onde, l'absorption neutre due à la brume. Pour éliminer ces deux dernières, il est nécessaire d'effectuer une comparaison avec une autre région spectrale voisine de la première mais ne subissant pas d'absorption sélective par la vapeur d'eau ou par d'autres constituants de l'atmosphère. Cette comparaison permettra donc d'éliminer dans les mesures, d'une part l'influence de la diffusion moléculaire qui dans ce domaine spectral varie très peu d'une région à l'autre et d'autre part l'absorption neutre qui est indépendante de la longueur d'onde mais variable dans le temps.

On compare donc les énergies de ces deux régions au moyen d'un photomultiplicateur qui reçoit alternativement les deux flux. Un dispositif optique (coin photométrique) placé sur l'une des deux voies (région non absorbante) permet de réaliser constamment l'égalité des deux flux. Les déplacements de ce coin sont comme nous allons le voir, liés aux seules variations de l'absorption dans la bande absorbante (ρ, σ, τ) c'est-à-dire aux variations de l'épaisseur d'eau condensable ; par conséquent, après étalonnage, l'appareil peut être utilisé pour la mesure de l'épaisseur d'eau condensable sur le trajet du rayonnement solaire ou lunaire.

Pour réaliser l'isolement des deux régions spectrales on opère de la façon suivante. La lumière, en provenance de l'astre, après avoir traversé, dans le cas du Soleil, un filtre neutre affaiblissant A (figure 1) placé à l'entrée, tombe sur une lame semi-transparente M qui la divise en deux faisceaux.

Le faisceau réfléchi est dirigé sur un miroir M_2 qui le renvoie sur le récepteur d'énergie après lui avoir fait traverser un filtre interférentiel F_2 isolant la région spectrale entourant la bande d'absorption de la vapeur d'eau ρ, σ, τ (9 360 A°). L'intensité de ce faisceau variera donc avec la quantité de la vapeur d'eau traversée le long du parcours dans l'atmosphère.

Le faisceau transmis par M traverse un coin photométrique C en verre neutre qui peut coulisser le long de son axe, de sorte que son facteur de transmission varie linéairement en fonction du déplacement. La lumière traverse ensuite un filtre interférentiel F_1 qui isole une région spectrale autour de 8 600 A°, non absorbée par la vapeur d'eau et servant de référence afin d'éliminer dans la mesure de l'épaisseur d'eau condensable les autres causes d'absorption (diffusion moléculaire, absorption neutre) ; le faisceau est ensuite envoyé sur le récepteur après réflexion sur M_1 et la lame M'. Un disque modulateur denté D entraîné par un moteur tournant à 2 800 t/min permet de masquer l'un des deux faisceaux, tandis que l'autre se trouve démasqué, la

fréquence de modulation étant de 520 Hz. Le courant obtenu est envoyé après amplification dans un discriminateur de phase, qui sépare les deux alternances correspondant aux deux voies optiques. On aboutit à un courant continu dont le sens et l'amplitude sont fonction de l'énergie de chacun des deux faisceaux lumineux tombant sur le photomultiplicateur. Ce courant continu alimente un relais polarisé, sensible au sens du courant d'excitation. Une cellule auxiliaire C' placée au voisinage d'une des deux voies reçoit d'une source lumineuse auxiliaire S de la lumière modulée par le disque D. Cette cellule va donc fournir un courant périodique de fréquence identique au courant sortant du photomultiplicateur et en phase avec la voie 9 360 A°, utilisée comme référence de phase dans le discriminateur. Dans le but de conserver au système discriminateur de phase toute la sensibilité désirable, malgré les variations d'énergie subies par le photomultiplicateur, il est nécessaire de stabiliser le mieux possible l'amplitude du signal de référence. Le relais polarisé dont le fonctionnement est déterminé par le discriminateur commande à son tour la mise en marche du moteur qui assure le déplacement du coin photométrique placé dans la voie 8 600 A°. Le sens du déplacement du relais provoque une rotation de moteur commandant le déplacement du coin dans un sens tel qu'il compense la diminution ou l'augmentation d'énergie dans ce faisceau. C'est ce déplacement que l'on enregistre.

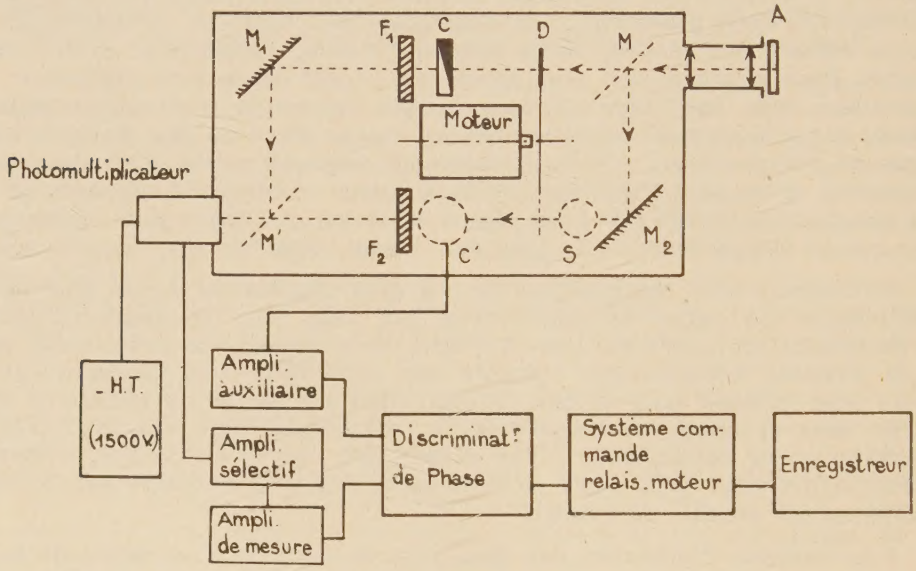

Fig. 1

II - PARTIE OPTIQUE -

1/ Choix de la région spectrale.

Pour déterminer l'épaisseur réduite d'eau condensable contenue sur le trajet de la lumière incidente, nous employons la méthode classique de Bouguer-Langley [18] et utilisée par Fabry et Buisson [19]. On sait que lorsqu'un faisceau de lumière parallèle et monochromatique traverse un milieu homogène absorbant, il subit un affaiblissement suivant la loi :

$$E = E_o \, 10^{-\alpha x} \qquad (2)$$

où E est le flux incident, E le flux transmis après avoir traversé une épaisseur x du milieu et α le coefficient d'absorption du milieu homogène pour la longueur d'onde considérée. Donc la quantité :

$$\alpha x = \log \frac{E_o}{E} = D \qquad (3)$$

est la densité optique de l'épaisseur absorbante (x) traversée. Si la loi de Beer [20] est valable, l'absorption est proportionnelle au nombre des molécules absorbantes, le coefficient α sera proportionnel à la pression et inversement proportionnel à la température absolue du milieu. Si l'on considère le gaz ramené aux conditions normales de température et de pression, x sera l'épaisseur réduite.

D'après A. et E. Vassy [21] on sait que la densité optique D de l'atmosphère est la somme de plusieurs termes :

1/ L'absorption sélective (vraie) - Si, pour une certaine radiation α est le coefficient d'absorption et x l'épaisseur réduite suivant la verticale, la densité optique de l'atmosphère quand le Soleil est à la distance zénithale Z a pour valeur α x secZ.

2/ L'absorption due à la diffusion moléculaire de la lumière par l'atmosphère ; elle est inversement proportionnelle à la quatrième puissance de la longueur d'onde. Si β est la densité optique de l'atmosphère suivant la verticale due à cette cause, la diffusion moléculaire procure une densité optique : β secZ.

3/ L'absorption due à la brume et aux poussières ; celle-ci est parfois importante elle varie d'une manière irrégulière et imprévisible, mais elle varie très peu avec la longueur d'onde et peut être considérée comme ayant, à chaque instant, une valeur fixe δ.

La méthode choisie consiste à isoler une bande d'absorption sélective de la vapeur d'eau. En choisissant le Soleil comme source on effectue la mesure de la densité optique de l'atmosphère pour deux longueurs d'ondes λ_1 et λ_2 telles que l'absorption sélective soit nulle pour λ_2 et suffisamment grande pour λ_1, on a donc pour λ_1 (absorbante) :

$$\log E = \log E_o - \alpha x \sec Z - \beta \sec Z - \delta \qquad (4)$$

et pour λ_2 (non absorbante) :

$$\log E' = \log E'_o - \alpha' x \sec Z - \beta' \sec Z - \delta \qquad (5)$$

en retranchant membre à membre pour éliminer δ, posant $\log \frac{E_o}{E'_o} = K$ on a :

$$\log E - \log E' = K - (\alpha - \alpha') x \sec Z - (\beta - \beta') \sec Z \qquad (6)$$

On voit que pour un instant donné le rapport des deux flux dépend d'une part de la différence des coefficients d'absorption de la vapeur d'eau dans les deux régions et d'autre part de la différence de l'absorption par diffusion moléculaire β. Il est assez facile de déterminer l'absorption par diffusion moléculaire au moyen de la formule de Rayleigh-Cabannes [22] :

$$\beta = \frac{10^5 \, m. \, 8 \, \pi^3 \, (\mu^2 - 1)^2 \, (6 + 3 \rho)}{3n \, \lambda^4 \, (6 - 7\rho)} \qquad (7)$$

où :

m = 0,4343 ;

λ = longueur d'onde de la radiation en centimètre ;

μ = indice de réfraction ;

n = nombre de molécules contenues dans 1 cm^3 de gaz dans les conditions normales :

ρ = facteur de dépolarisation de lumière diffusée à 90° du faisceau incident et qui ne dépend que de l'anisotropie des molécules de l'air.

Comme nous connaissons les variations de l'indice de réfraction de l'air avec la longueur d'onde, nous avons calculé les densités optiques dues à la diffusion moléculaire relatives à une masse d'air unité (l'épaisseur réduite de l'atmosphère étant 8 kilomètres) par les deux régions spectrales avec les valeurs suivantes :

λ_1 = 9 400 Å $\quad \mu_1 = 1,000\ 2740 \quad n = 2,68 \times 10^{19}$

λ_2 = 8 600 Å $\quad \mu_2 = 1,000\ 2744 \quad \rho = 0,031$ [23]

on obtient :

$$\beta_{9400} = 4,32 \times 10^{-3}$$

$$\beta_{8600} = 6,0 \times 10^{-3}$$

où $|\beta - \beta'| = 1,7 \times 10^{-3}$.

Pour déterminer les variations de la densité optique dans la bande ρ, σ, τ en fonction de l'épaisseur d'eau condensable en utilisant la courbe d'étalonnage de notre appareil (chapitre 2), nous avons calculé la densité optique des différentes positions du coin photométrique (la densité optique connue) correspondant à différentes épaisseurs réduites de la vapeur existant dans l'atmosphère et nous avons trouvé que pour une valeur moyenne de l'épaisseur d'eau condensable de 1,50 cm, la densité optique moyenne est $(\alpha - \alpha')\ x = 0,138$ pour la totalité de l'atmosphère (masse d'air unité).

En comparant les valeurs de $(\alpha - \alpha')\ x$ et $(\beta - \beta')$ on voit que la valeur de la diffusion moléculaire est négligeable devant l'absorption sélective. Nous avons donc :

$$\log E - \log E' = K - (\alpha - \alpha')\ x\ \sec Z \qquad (8)$$

Puisque λ_1 est choisi dans une région où seule la vapeur d'eau absorbe, le rapport des deux flux sera proportionnel à la quantité de vapeur d'eau interposée sur le trajet des rayons utilisés.

La première question à résoudre est donc le choix de la région spectrale. Pour ce choix les considérations précédentes ne seront pas les seules à nous guider : on doit également tenir compte du récepteur.

Il est nécessaire d'avoir une idée de l'importance relative des différentes bandes ultra violettes [24], [25], visibles [26] - [28] et infra-rouges [29] - [34]. Il est en effet difficile de parler ici de coefficient d'absorption, cette notion n'ayant pas de valeur intrinsèque dans le cas des bandes résolubles, car le coefficient d'absorption varie essentiellement dans ce cas avec la dispersion et même dans une faible mesure avec l'épaisseur de l'absorbant interposé (excepté lorsqu'il est possible de faire porter les mesures sur un rayonnement rigoureusement monochromatique). On a donc mesuré [21] au laboratoire les coefficients d'absorption de la vapeur d'eau : les résultats obtenus sont représentés sur la figure (2) en fonction de la longueur d'onde.

La densité optique est donnée pour une épaisseur d'eau condensable de un centimètre, la dispersion étant de 125 Å au mm vers 7 000 Å. Pour améliorer la précision, nous avons évidemment intérêt à faire porter la mesure sur une bande d'absorption assez intense, mais comme l'amplitude de l'épaisseur d'eau condensable dans l'atmosphère varie rapidement, si nous augmentons le coefficient d'absorption en choisissant une autre bande d'absorption très intense, les variations étendues du courant de cellule poseront de nombreux problèmes quant au choix et à la réalisation d'un amplificateur approprié.

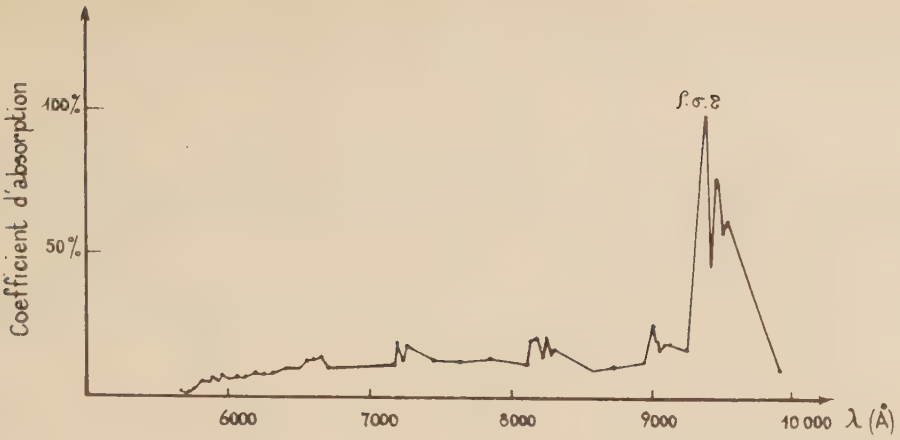

Fig. 2

Nous voyons sur la figure (2) que, seule la bande 9 300-9 600 Å répond à nos besoins, ce qui nous permettra l'emploi d'un photomultiplicateur d'électrons.

Il faut noter qu'en dehors de l'absorption sélective et de l'absorption par diffusion moléculaire, il existe des petites particules solides ou liquides comme les gouttelettes d'eau qui jouent également un rôle affaiblissant. On sait que l'affaiblissement par les gouttelettes d'eau est, d'une part dû à l'absorption propre des particules et d'autre part à la diffusion par les gouttelettes. Mais comme Middleton [35] l'a montré, l'absorption propre par les particules est très faible par rapport à la diffusion et le rapport flux absorbé/flux diffusé est de l'ordre de 10^{-5}, c'est-à-dire négligeable. Pour la diffusion par les gouttelettes d'eau, d'après les travaux de Mie [36], Debye [37] Stratton et Houghton [38] on sait que pour une sphère d'eau liquide de rayon a en suspension dans l'air la perte d'énergie par diffusion est :

$$b = 2\pi a^2 K \qquad (9)$$

où K est une fonction de la longueur d'onde, du rayon de la sphère, de l'indice de réfraction du milieu et de celui de sphère $K = f(\alpha)$ avec $\alpha = \frac{2\pi a}{\lambda}$.

Si les sphères sont suffisamment éloignées les unes des autres, N étant le nombre de particules par unité de volume, le coefficient de diffusion par les particules sera Nb et la densité optique γ pour 1 Km de 10^5 Nb.

Les déterminations du rayon et du nombre de particules ne sont pas faciles : en s'appuyant sur les résultats obtenus par Dessens [39] nous avons calculé cette densité avec :

$$a = 0,^{\mu}1 \qquad \mu = 1,33$$
$$\overline{N} = 200 \qquad \lambda = 9\,400 \text{ Å}$$

on trouve pour α une valeur de 0,7 qui correspond d'après les données de [35] à K = 0,015. On obtient donc :

$$\gamma_{1\,Km} = 0,12 \times 10^{-3}$$

Pour calculer cette densité pour une masse d'air unité il faut connaitre la répartition du nombre de gouttelettes d'eau en fonction de l'altitude. Les

résultats obtenus par Angstrom [40] ont montré que la variation de γ est proportionnelle au nombre de particules et que celui-ci se trouve divisé par 2 pour une variation d'altitude de l'ordre de 1,5 km. Nous avons donc :

$$\gamma = 0,27 \times 10^{-3}$$

On voit que le rapport de la densité optique due à la diffusion par les gouttelettes d'eau à la densité optique de la vapeur d'eau obtenue précédemment pour une même région spectrale est inférieur à 1/500. On peut donc négliger cet affaiblissement.

L'oxygène n'absorbant pas au-delà de 7 700 Å, nous avons donc choisi pour λ_1 la bande 9 300-9 600 Å (ρ, σ, τ) et pour λ_2 la bande 8 420-8 720 Å ; dans cette dernière région il ne se présente pas de bande d'absorption sélective.

On peut donc admettre que les déplacements du coin photométrique seront liés seulement aux seules variations de la quantité de vapeur d'eau existant dans l'atmosphère.

2/ Héliostat et sélénostat.

Pour diriger la lumière des sources extra terrestres (soleil et lune) sur l'appareil, nous avons utilisé deux dispositifs mécaniques à mouvement d'horlogerie appelés héliostat pour le Soleil et sélénostat pour la Lune. Chaque dispositif possède un miroir : grâce à différentes combinaisons de mouvements on peut obtenir un rayon réfléchi fixe. Plusieurs réglages sont en général prévus : latitude, date (intervention de la déclinaison), heure ; il faut placer ce dispositif devant l'appareil de sorte que le rayon réfléchi par le miroir de l'héliostat et l'axe optique de l'appareil soient confondus. Le bon fonctionnement du système dépend :

- de sa mise en station (horizontalité de la base, orientation des axes) ;
- de la régularité du mouvement d'horlogerie ;
- de la propreté du miroir (dépôt de buée durant la nuit).

Les vibrations dues au vent ou une faible erreur sur l'un de ces réglages entraînent au cours du temps un déplacement du rayon réfléchi et nécessitent l'emploi d'un moyen de contrôle précis.

3/ Sténopé.

Pour cela nous avons installé sur le tube porte lentilles à l'entrée de l'appareil un système de sténopé (figure 3).

Le réglage est tel que l'axe du sténopé et l'axe du faisceau incident sont rigoureusement parallèles. Dans le cas d'une mauvaise poursuite de l'astre par l'héliostat un simple coup d'œil sur le sténopé permet d'apprécier l'importance de l'erreur et le sens de la correction à effectuer, (qui est faite manuellement).

4/ Lentilles.

Supposons que le miroir de l'héliostat s'écarte d'un angle α (mauvaise poursuite de l'astre de la position correcte). Ceci provoque une déviation du rayon réfléchi $\hat{\beta} = 2\hat{\alpha}$; ce changement de l'incidence par rapport à l'axe principal de l'appareil va nous donner un déplacement important du faisceau incident sur le récepteur (figure 4).

Calcul de la déviation des rayons incidents.

Admettons que le maximum de déviation de l'image du sténopé soit 1,5 mm par rapport au centre de la mire (la distance du trou du sténopé à la mire étant 150 mm). Nous avons :

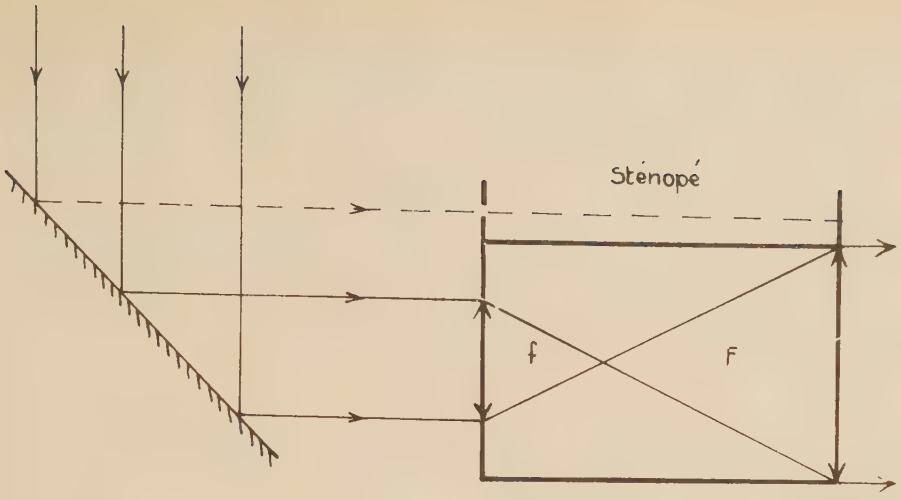

Fig. 3

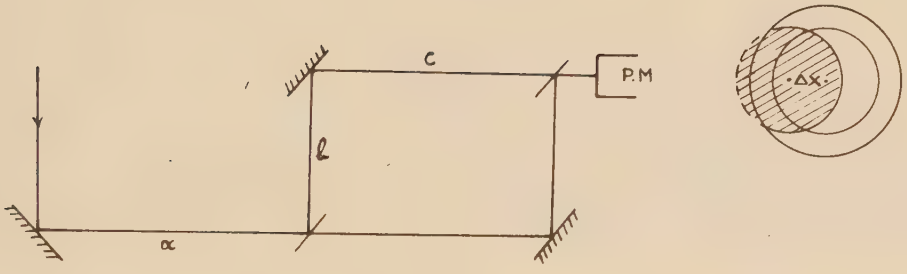

Fig. 4

$$\text{tg } \hat{\beta} = \frac{1,5}{150} = \frac{1}{100} \text{ Radian}$$

Le centre du faisceau de lumière parallèle se déplacera sur le récepteur de :

$$\Delta x = L \text{ tg} \hat{\beta} \qquad (10)$$

avec :

$$L = a + b + c$$

$$a = 850 \text{ mm} \qquad b = 200 \text{ mm} \qquad c = 400 \text{ mm}$$

donc $\Delta x = 14,5$ mm.

Le diamètre de la partie sensible du récepteur électronique étant de 32 mm et comme la dimension des deux faisceaux tombant sur la photocathode est : 20 × 17 mm avec coïncidence exacte de ces deux faisceaux sur la couche sensible, nous voyons qu'un déplacement du faisceau de $\Delta x = 14,5$ mm par rapport à son centre va diminuer considérablement l'énergie incidente reçue par le récepteur et par conséquent fausser le fonctionnement normal de l'appareil.

Pour éviter ces inconvénients, nous avons mis au point un système de

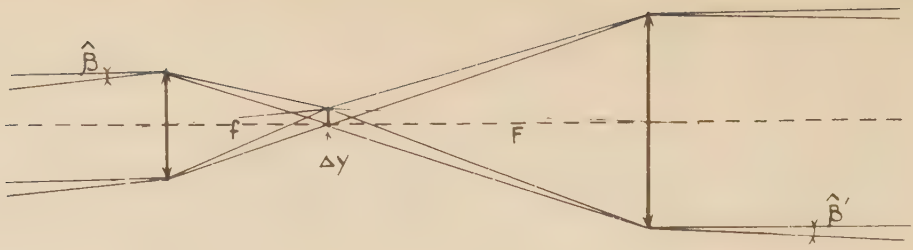

Fig. 5

lentilles convergentes (figure 5) placé à l'entrée de l'appareil. Ce dispositif nous permet de diminuer au maximum la déviation du faisceau incident. Il est composé d'une lentille convergente de 50 mm de focale (Φ = 16 mm) recevant la lumière incidente et d'une seconde lentille convergente de 100 mm de focale (Φ = 32 mm) les deux foyers étant confondus (système afocal). En effet, on aura :

$$\Delta y = f \operatorname{tg} \hat{\beta} = F \operatorname{tg} \hat{\beta}' \qquad (11)$$

ou :

$$\frac{f}{F} = \frac{\operatorname{tg} \beta'}{\operatorname{tg} \beta}$$

Δy étant le déplacement de l'image au foyer commun,

$\hat{\beta}'$ l'angle de déviation du faisceau à la sortie du dispositif,

$\hat{\beta}$ étant la déviation à l'entrée.

En tenant compte de $\frac{f}{F} = \frac{1}{2}$ on a $\operatorname{tg} \hat{\beta}' = \frac{1}{200}$ Radian.

Dans le cas où l'on utilise ce système de lentilles, le déplacement du faisceau sur le récepteur sera :

$$\Delta x = L' \operatorname{tg} \hat{\beta}'$$

avec L' = b + c d'où :

$$\Delta x = 3 \text{ mm}$$

on voit qu'à l'aide de ces lentilles au lieu d'un déplacement de 14.5 mm sur la photocathode, nous n'aurons plus que 3 mm, ce déplacement ne pouvant pas fausser nos mesures et comme le système utilisé est un système afocal, nous n'avons donc qu'un faisceau de lumière parallèle sur la photocathode et le champ dans ce cas est celui de l'angle de déplacement de l'axe optique de l'héliostat par rapport à l'axe de l'appareil. Il modifie la position de l'image du faisceau sur la photocathode, et comme nous venons de le montrer, le champ maximum pour le bon fonctionnement du système optique sera $\operatorname{tg} \hat{\alpha}$ 1/100 Radian soit $\hat{\alpha}$ = 35'.

5/ Filtres affaiblissants.

Nous avons déjà indiqué que l'appareil réalisé est capable de fonctionner avec la Lune ou le Soleil comme source de lumière. Pour que le niveau d'énergie à l'entrée soit à peu près le même dans les deux cas il faut donc diminuer l'intensité du rayonnement dans le rapport des énergies de ces deux sources au moyen d'un filtre affaiblissant dans le cas du Soleil.

Cette obligation a nécessité la préparation de différents filtres affaiblissants obtenus en voilant des plaques photographiques et en les développant. Nous avons choisi une série parmi les plus homogènes ; leurs densités mesurées au microdensitomètre sont reportées dans le tableau n° I, ainsi que leurs facteurs de transmission.

Tableau I

n°	densité du filtre	fact. trans.	n°	densité du filtre	fact. trans.	n°	densité du filtre	fact. trans.
1	0,24	0,57	9	0,64	0,22	17	3,48	0,0003
2	0,32	0,50	10	1,20	0,062	18	3,60	0,00025
3	0,36	0,43	11	1,28	0,057	19	4,02	0,00009
4	0,46	0,34	12	1,34	0,047	20	4,35	0,00004
5	0,47	0,33	13	1,44	0,037	21	4,47	0,000033
6	0,49	0,32	14	1,92	0,012	22	4,49	0,000029
7	0,58	0,26	15	2,47	0,003			
8	0,62	0,24	16	2,79	0,0016			

En ce qui concerne le choix d'un filtre affaiblissant dans le cas du Soleil, nous avons tout d'abord mesuré au moyen d'un oscillographe cathodique, le maximum et le minimum de l'amplitude des signaux reçus par le photomultiplicateur, dans le cas du rayonnement direct de la Lune et correspondant à différentes distances zénithales et à l'âge de la Lune du 10ème au 20ème jour lunaire. Puis nous avons déterminé les différents filtres affaiblissants de manière à conserver la même amplitude dans tous les cas. Parmi les filtres affaiblissants le n° 22 répond à nos besoins.

Nous avons donc choisi celui-ci pour toutes les mesures effectuées avec le Soleil. Ce filtre possède un facteur de transmission de 0,000029 soit une densité de 4,49. Il faut noter que les mesures ont été effectuées seulement pour la voie 8 600 Å qui ne présente aucune absorption sélective due soit à la vapeur d'eau, soit aux autres constituants de l'atmosphère. Pour cette étude le coin maintenu fixe est disposé de telle sorte que le rayonnement incident le traverse dans sa région médiane.

6/ Filtres interférentiels.

Pour isoler les deux régions spectrales (9 300-9 600 Å) et (8 420-8 720 A°) nous avons employé des filtres interférentiels à couches métalliques dérivés de l'interféromètre Pérot-Fabry [41].

Les dimensions des filtres sont 50 × 50 mm. Le maximum de la bande passante est situé pour l'un à 9 520 Å et pour l'autre 8 620 Å. On sait que par inclinaison on peut déplacer le maximum vers les courtes longueurs d'onde [41].

Nous avons étudié expérimentalement ces déplacements en inclinant les filtres par rapport au faisceau incident (figure 6). D'après le spectre solaire obtenu au spectrographe, on détermine les limites extrêmes de transmission pour la bande ρ, σ, τ soit 9 300-9 600 Å ($\Delta\lambda$ = 300 A°) et la longueur d'onde moyenne de la bande passante pour cette région sera 9 450 Å.

L'étude spectrophotométrique des deux filtres interférentiels F_1 et F_2 nous a permis de déterminer la variation de la longueur d'onde pour la transmission maximum en fonction de l'angle d'incidence du faisceau de lumière

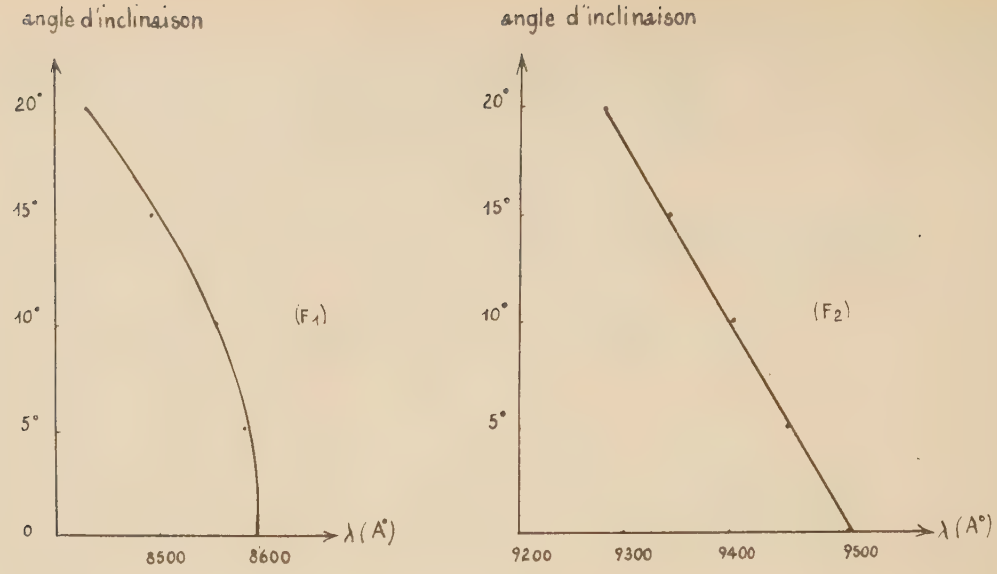

Fig. 6

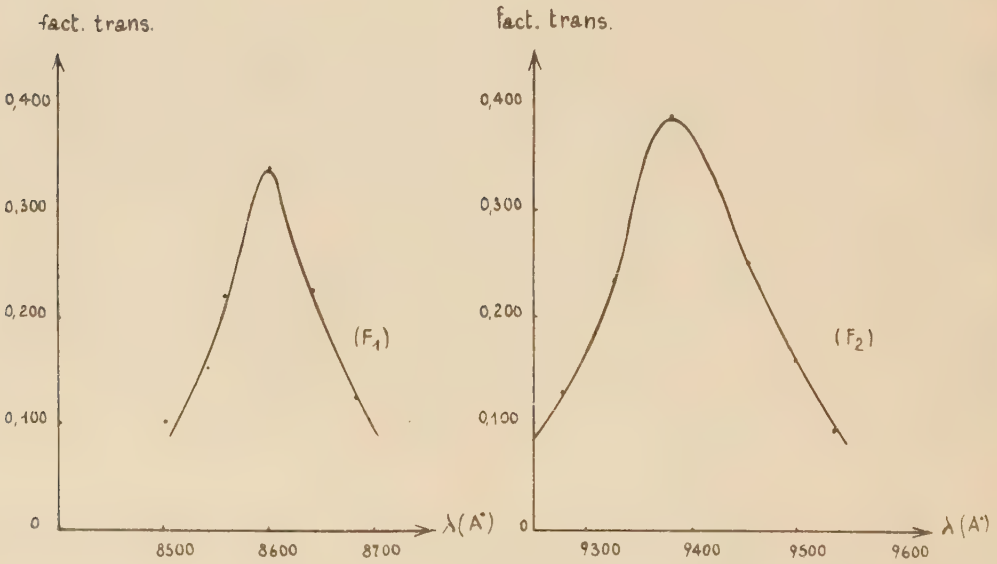

Fig. 7

parallèle traversant ces filtres ainsi que leurs facteurs de transmission en fonction de la longueur d'onde pour l'incidence correspondant à l'utilisation dans l'appareil (figure 7). Cet angle d'incidence sera de 10° pour le filtre correspondant à la bande ρ, σ, τ (F_2) et 0° pour l'autre filtre (F_1).

7/ Coin photométrique.

Comme nous l'avons déjà indiqué la variation de la densité optique de l'atmosphère est due à la variation de la vapeur d'eau, dans la région des bandes ρ, σ, τ (9 300-9 600 Å). Au cours du temps la quantité totale de vapeur d'eau variant, les énergies provenant des deux trajets optiques (absorbant

et non absorbant) ne seront donc pas les mêmes. Si nous plaçons dans la voie ne subissant pas l'absorption un coin photométrique mobile, de manière à équilibrer l'énergie des deux voies (sur le photomultiplicateur) on pourra après étalonnage relier la variation de la vapeur d'eau sur le trajet du rayonnement solaire aux déplacements de ce coin.

Choix du coin photométrique.

Ce choix tiendra compte :

- de la neutralité du coin (absorption non sélective pour les longueurs d'onde utilisées) ;
- de la sensibilité des mesures ;
- des grandes variations de vapeur d'eau qu'il devra enregistrer.

Ces raisons impératives nous ont conduit à choisir un coin photométrique de verre neutre de longueur 150 mm, de largeur 40 mm, la densité optique variant linéairement de 0 à 1 pour la longueur totale.

8/ Récepteur de mesure.

Nous avons déjà indiqué que pour étudier les phénomènes de condensation de la vapeur d'eau pendant la nuit il fallait utiliser la Lune comme source de rayonnement. Nous savons par ailleurs qu'en période de pleine Lune le maximum d'éclairement étant de 0,2 Lux, il faut donc choisir une cellule très sensible. Le capteur utilisé est un photomultiplicateur d'électrons type 150 C.V.P. (Radiotechnique) à dix étages. Cette cellule possède une photocathode de type césium sur Argent oxydé [42] destinée à la détection des rayonnements situés dans le proche infrarouge et correspondant aux régions spectrales citées précédemment. La réponse spectrale de ce type de cellule possède un maximum vers 9 000 Å.

III - PARTIE ELECTRONIQUE -

1/ Caractéristiques du photomultiplicateur et dispositif d'alimentation.

La haute tension du photomultiplicateur, de l'ordre de 1 500 volts, est fournie par une alimentation stabilisée à 0,1 % du type A-R_3-2 500 de la "Technique Nucléaire". La haute tension débite dans un circuit en pont (figure 8) comprenant les résistances suivantes :

$$R_1 = 200\ K\Omega$$
$$R_2 = R_3 = R_4 = \ldots\ldots = R_{10} = 150\ K\Omega$$
$$R_{11} = 80\ K\Omega$$
$$R_{12} = 1\ M\Omega$$

D'autre part les caractéristiques principales du photomultiplicateur sont citées ci-dessous.

Photocathode :

- Diamètre de la partie utile : 32 mm ;
- Sensibilité : 31,2 µA/Lu.

Anode :

- Sensibilité moyenne : 94,5 µA/Lu ;
- Courant anodique maximum en régime permanent : 1 mA.

Le courant d'obscurité du photomultiplicateur est $8,9 \times 10^{-9}$ A pour une sensibilité anodique de 20 µA/Lu sous une tension de 1 400 volts. Le courant

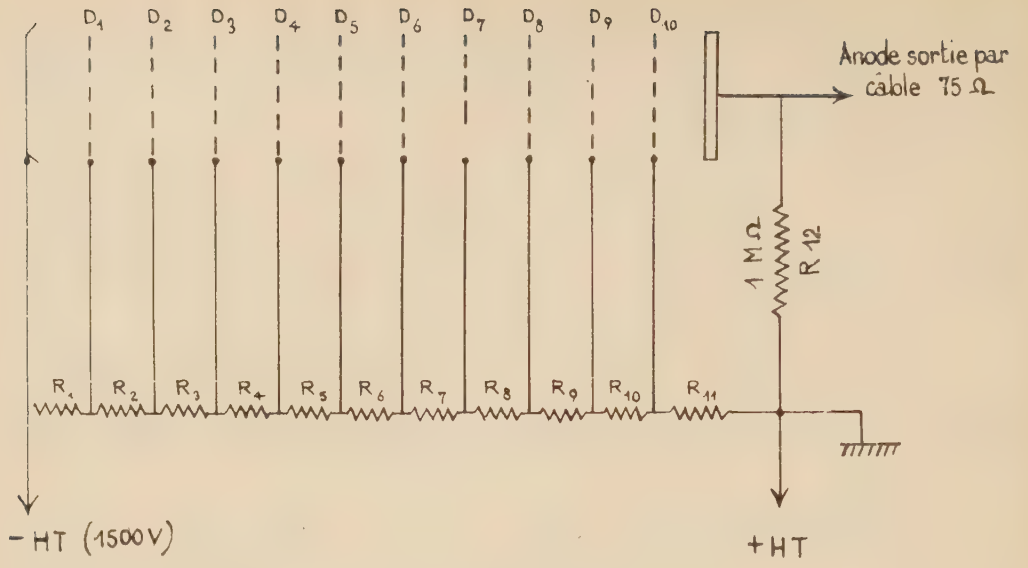

Fig. 8

anodique étant insuffisant pour le fonctionnement direct de l'appareil il est nécessaire de l'amplifier. Pour cela nous avons réalisé et mis au point un amplificateur de tension alternative avec préamplificateur sélectif que nous allons décrire ainsi que son alimentation au paragraphe suivant.

2/ Alimentation.

L'alimentation de notre amplificateur en courant continu nécessite le redressement du courant du secteur. Pour cela, nous avons utilisé une double diode à vide de type 5Y3GB permettant de redresser les deux alternances par l'intermédiaire d'un transformateur dont l'enroulement alimentant les diodes du tube redresseur possède une sortie à son point milieu (voir figure 11). Le chauffage de ce tube est assuré en alternatif par un secondaire donnant une tension efficace de 5 volts. La cathode (positif de la tension redressée) est reliée au filament. Pour supprimer la composante alternative résiduelle dans le courant redressé, nous avons placé à la suite de la diode une cellule de filtrage composée d'une self inductance (L = 10 H, R = 250 Ω) et de deux condensateurs électrochimiques de forte capacité C_1 et C_2 (2 × 32 μ F). La borne positive de C_1 est reliée à la cathode et la borne négative au point milieu du secondaire ; les trois résistances R connectées en parallèle nous permettent d'ajuster la tension de sortie à la valeur de 270 volts, qui est la tension nécessaire au bon fonctionnement des circuits de l'amplificateur.

Les chauffages des cathodes des différents tubes sont assurés par une tension alternative efficace de 6 volts, fournie par un enroulement secondaire du transformateur ; une tension négative et réglable dans une certaine limite (l'expérience nous a montré que la tension optimum était de l'ordre de - 11 volts) permet de régler le seuil de fonctionnement d'un discriminateur de phase incorporé à l'amplificateur.

3/ Préamplificateur sélectif.

Nous avons signalé auparavant que le courant délivré par le photomultiplicateur étant faible, il était nécessaire de l'amplifier. On sait qu'au signal de mesure donné par un photomultiplicateur s'ajoute un signal dû au courant d'obscurité et lié aux conditions de fonctionnement de celui-ci et à la température ambiante [43]. Pour éliminer dans la mesure du possible l'influence

de ce courant d'obscurité et pour éviter d'amplifier les signaux d'origine extérieure, principalement dûs à l'influence du secteur (50 Hz), nous avons réalisé un préamplificateur sélectif à bande étroite 520 ± 5 Hz, dont les éléments caractéristiques sont énumérés et analysés ci-après.

a) Amplification.

L'appareil réalisé est un amplificateur de tension composé de deux pentodes EF 40 et EL 41 (liaison résistance-capacité) alimenté sous une tension de l'ordre de 225 volts continu (figure 9). Le courant obtenu par le photomultiplicateur traverse une capacité de 10 PF, puis passe dans les deux étages d'amplification. Le gain maximum de cet amplificateur est :

$$G_{max} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{0,001} = 1000 \qquad (12)$$

où :

$$g = 20 \log_{10} |G| = 60 \quad \text{décibels}$$

C'est au cours de l'amplification dans les deux étages que s'opère le filtrage du signal utile.

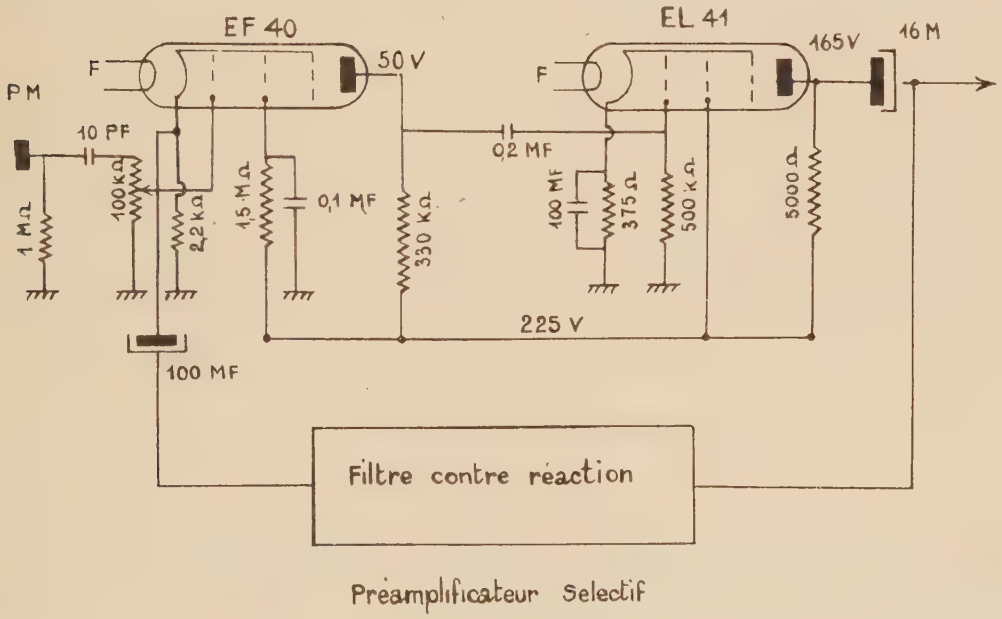

Fig. 9

b) Le filtre sélectif.

Le principe utilisé est celui bien connu de l'emploi d'une boucle de contre réaction sélective. Une fraction du signal issu des deux étages d'amplification est renvoyée en opposition de phase par rapport au signal d'entrée (contre réaction) : si dans cette boucle on incorpore un système sélectif qui est dans le cas présent un pont en double T [42] atténuant la fréquence pour laquelle il a été calculé (soit 520 ± 5 Hz) on voit que le gain des deux étages d'amplification affectés par cette contre réaction sera maximum pour cette fréquence.

Le filtre dont nous donnons les éléments caractéristiques ci-dessous a été calculé au moyen des formules connues [44].

$$\frac{2}{C_1\omega} = C_2\,\omega\,R_2^2$$

$$\frac{1}{C_1\omega} = 2\,C_1\,\omega\,R_1\,R_2 \qquad (13)$$

$$R_2\,C_2 = 4\,R_1\,C_1$$

Les éléments ainsi déterminés du filtre sont les suivants (voir figure 11) :

$$R_1 = R_2 = 8\,300\,\Omega$$
$$C_1 = 27\,000\ PF$$
$$C_2 = 108\,000\ PF$$

Ce filtre est incorporé entre la plaque de la lampe finale EL 41 et la cathode de la lampe d'entrée par l'intermédiaire de deux capacités chimiques de l'ordre de 16 et 100 µF. Les résistances R_1, R_2 du filtre se composent chacune d'une résistance variable dont la valeur est comprise entre 7 000 et 9 000 Ω permettant le calage sur la fréquence désirée.

La courbe de sélectivité (figure 10) a été relevée à l'aide d'un générateur basse fréquence et d'un voltmètre électronique. Les résultats sont indiqués dans le tableau ci-dessous (tableau II).

Tableau II

N H_z	V volts	N H_z	V volts	N H_z	V volts	N H_z	V volts
50	0,15	350	1,30	518	51,00	700	1,50
100	0,31	400	1,90	520	51,00	750	1,20
150	0,44	450	4,60	525	40,00	800	1,00
200	0,57	475	6,80	550	9,00	900	0,80
250	0,73	500	17,00	600	4,10	1 000	0,62
300	0,97	510	46.00	650	3,00		

La courbe obtenue montre que cet amplificateur est stable pour 520 ± 5 H_2. Nous avons également vérifié la stabilité du degré de sélectivité de cet amplificateur par changement de la tension d'alimentation ; les résultats montrent que le degré de sélectivité est peu affecté par ces variations.

4/ Amplificateur de mesure.

Le courant à la sortie du préamplificateur sélectif, après avoir traversé une capacité de 0,2 µ F (voir figure 11), est envoyé sur la grille d'une pentode de type EF 41 dont la deuxième grille est alimentée sous une tention de 45 volts, filtrée par une capacité de 0,1 µ F, la tension continue de l'anode est de 85 volts. Le signal sortant de ce tube passe dans un potentiomètre de 250 KΩ permettant d'ajuster le gain à sa valeur optimum. L'anode du deuxième tube EF 41 est reliée d'une part à l'enroulement primaire d'un transformateur TR1 et d'autre part à la grille G_2 de ce même tube ; l'autre extrêmité du primaire de ce transformateur est connectée au + HT au travers d'une cellule de filtrage. Ce transformateur a pour but d'alimenter sous forme symétrique l'étage suivant fonctionnant en discriminateur de phase. Le point milieu de TR1 est porté à la tension de -11 volts, cette tension négative étant réglable et permettant ainsi de déterminer le seuil de sensibilité de l'étage suivant.

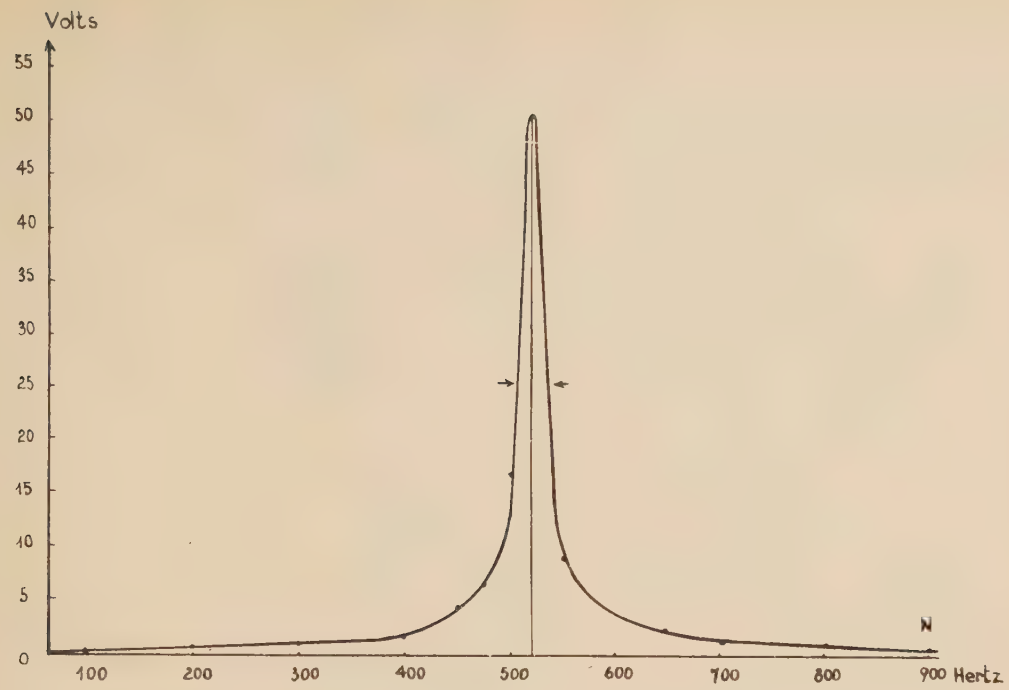

Fig. 10

La tension nécessaire à l'alimentation des anodes de ces tubes est indiquée sur le schéma, le gain maximum de cet amplificateur mesuré entre la grille G_1 du premier tube EF 40 et une grille ECC 40 est donné par :

$$G_{max} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{3}{0,05} = 60$$

$$g_{max} = 20 \log_{10} |G| = 35,4 \text{ décibels}$$

Un examen à l'oscilloscope du signal apparaissant sur l'anode du deuxième tube EF 41 montre que ces signaux sont fortement écrêtés pour une valeur même très faible du signal provenant du photomultiplicateur. C'est ce fait (écrêtage du signal) qui, dans une large part, contribue à la stabilité de l'appareil lorsque le niveau d'énergie reçu par le photomultiplicateur varie dans des proportions appréciables. A titre d'exemple un signal de 100 μV d'amplitude appliqué à l'entrée de l'amplificateur provoque un écrêtage important du signal à l'entrée du discriminateur de phase.

5/ Dispositif électronique de référence.

Nous avons vu que pour détecter un changement de phase du signal de sortie du photomultiplicateur dû à une variation de la vapeur d'eau, il était nécessaire de disposer d'un signal de référence modulé à la même fréquence que les signaux de mesure. Les éléments principaux de ce dispositif de référence sont les suivants :

a) source de lumière ;

b) capteur électronique ;

c) amplificateur des signaux ;

d) système stabilisateur d'amplitude.

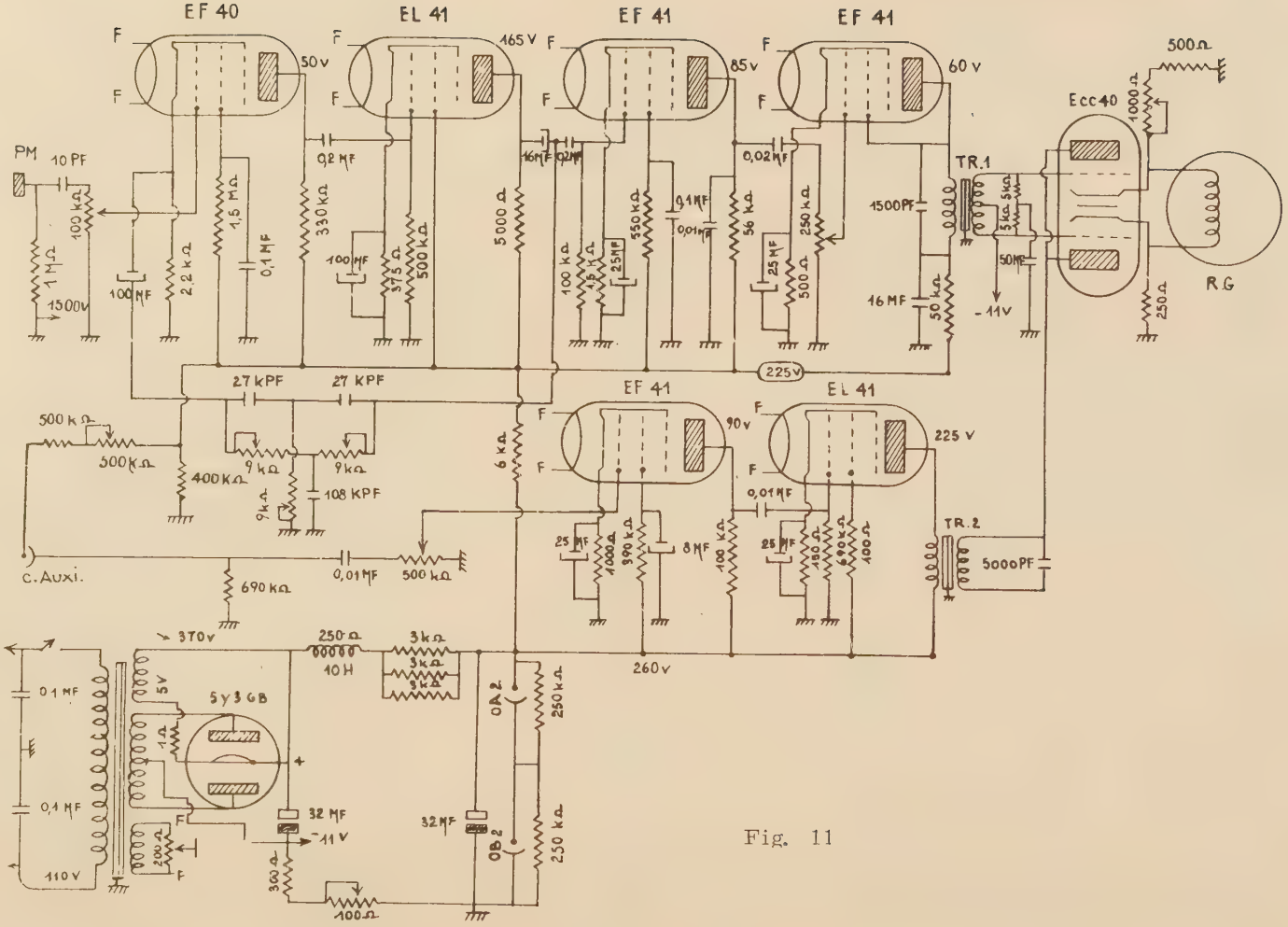
EF 40
EL 41
EF 41
EF 41
EF 41
EL 41
Ecc40
TR.1
TR.2
PM
10 PF
1 MΩ
100 kΩ
1500v
100 MF
2,2 kΩ
1,5 MΩ
0,1 MF
330 kΩ
0,2 MF
100 MF
375 Ω
500 kΩ
5000 Ω
16MF
0,2MF
100 kΩ
1,5 kΩ
25MF
550 kΩ
0,1MF
0,01MF
56 kΩ
0,02MF
25 MF
500 Ω
250 kΩ
1500PF
16 MF
50 kΩ
- 11V
50MF
5kΩ
5kΩ
500Ω
1000Ω
250Ω
R.G
50v
165 V
85v
60 v
225V
27 kPF
27 kPF
500 kΩ
500 kΩ
400 kΩ
9 kΩ
9 kΩ
9kΩ
108 KPF
6 kΩ
90v
225 v
0,01MF
25 MF
1000Ω
990 kΩ
8MF
100 kΩ
25 MF
180 Ω
690 kΩ
100 Ω
5000PF
c.Auxi.
690 kΩ
0,01MF
500 kΩ
260v
~ 370v
250Ω
10 H
3kΩ
3kΩ
3kΩ
3kΩ
0,1 MF
0,1 MF
110 V
5y3 GB
5V
1A
32 MF
- 11 V
32MF
360Ω
100Ω
200Ω
OA 2
OB 2
250 kΩ
250 kΩ

Fig. 11

a) Source de lumière.

Cette source est constituée par une petite ampoule à incandescence 6V, 01A alimentée en courant continu au moyen d'un redresseur et d'une cellule de filtrage (figure 12), ceci afin d'éviter une modulation parasite à 100 Hz de la lumière de cette ampoule. Comme nous l'avons dit précédemment, la lumière venant de cette source est modulée par le disque du modulateur à 520 Hz.

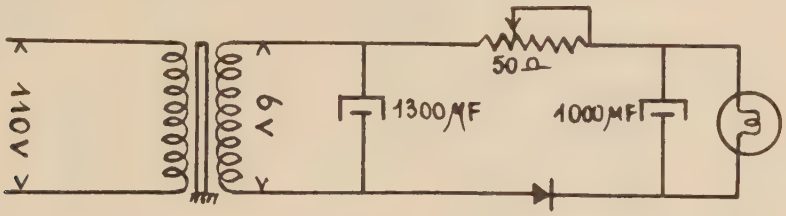

Fig. 12

b) Capteur électronique auxiliaire.

Il est constitué par une cellule photoélectrique à atmosphère gazeuse du type DARIO 3554, sensible aux rayonnements rouge et proche infra rouge et dont la stabilité au cours du temps peut être considérée comme suffisante pour l'utilisation qui en est faite. Cette cellule va fournir un courant modulé à 520 Hz, la phase de modulation de la lumière reçue par cette cellule étant la même que celle qui traverse la voie 9 360 Å. La tension anodique d'alimentation de la cellule est de 90 volts et la résistance de charge est de 690 KΩ.

c) Amplificateur des signaux auxiliaires.

Les signaux obtenus après avoir traversé une capacité de filtrage passent dans un potentiomètre (G) puis sont envoyés sur la grille du premier étage d'amplification : cette partie d'amplification comporte deux étages (couplage résistance-capacité) équipés de tubes EF 41 et EL 41 (voir figure 11). Pour donner une puissance convenable aux signaux amplifiés nous avons intercalé un convertisseur d'impédance, en l'espèce un transformateur TR2 dans le circuit de plaque du deuxième tube amplificateur. Le gain de cet amplificateur est G = 30 000 où g = 89,40 décibels.

d) Système stabilisateur de tension.

Par suite des variations d'amplitude possible du signal au secondaire de TR2 nous avons été amené à stabiliser la tension d'alimentation de cet amplificateur ; pour cela nous avons utilisé deux tubes régulateurs de tension à cathode froide connectés en série de telle sorte que malgré les variations du courant d'alimentation, la tension d'alimentation de cet amplificateur reste stable. Les tubes utilisés sont du type OA2 et OB2 (voir figure 11).

6/ Discriminateur de phase et son fonctionnement.

Comme nous l'avons déjà dit le principe de la mesure est celui de la pesée à tare constante (équilibre des énergies provenant des deux voies) ; il faut donc faire en sorte que l'équilibre soit maintenu, c'est-à-dire que si le flux lumineux reçu par le photomultiplicateur est plus grand ou plus petit pour la voie 9 360 que par la voie 8 600 Å, on doit commander le déplacement du coin dans le sens convenable de manière à revenir à l'équilibre. Il suffit alors d'enregistrer les positions du coin.

Le déplacement du coin photométrique est assuré par un moteur diphasé contrôlé par discriminateur, dont le fonctionnement est le suivant : le transformateur TR1 alimente d'une manière symétrique les deux grilles du tube discriminateur de phase ; pour cela il possède un secondaire symétrique alimentant une double triode à cathodes séparées, de type ECC40. Les deux enroulements symétriques provoquent un déphasage de π, chaque enroulement alimentant une grille de la double triode ECC40 (figure 13).

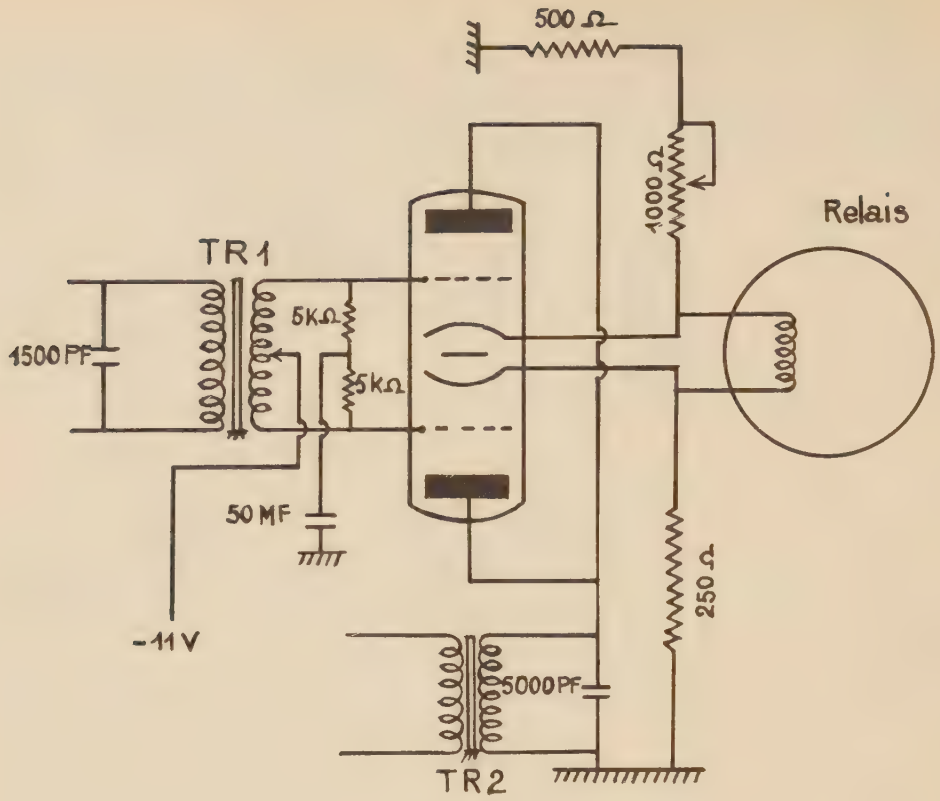

Fig. 13

Les anodes de ce tube sont alimentées en tension modulée à 520 Hz par l'intermédiaire du transformateur TR2, cette tension étant celle de référence. Le courant des anodes est donc en phase ou en opposition de phase avec celui provenant de la voie non absorbante. Donc une seule des tensions des grilles est en phase avec la tension des plaques, celle correspondant à la voie absorbante (9 360 Å) par exemple. Les cathodes de ce même tube sont reliées aux bornes d'un relais galvanométrique (RG), la polarisation de ces cathodes étant assurée par les deux résistances reliées à la masse.

Supposons que la quantité de vapeur d'eau diminue : donc l'énergie reçue par la voie 9 360 Å augmente (par rapport à l'autre) et la modulation résultante des deux signaux (figure 14-a) est en phase avec la tension alternative de référence.

Supposons au contraire que la quantité de vapeur d'eau augmente : donc l'énergie reçue par la voie 9 360 Å diminue et la modulation résultante des signaux (figure 14-b) est en opposition de phase ($\varphi = 180°$) avec la tension alternative de référence. C'est cette variation de phase du courant que nous avons utilisée pour commander le déplacement du coin photométrique dans l'un ou l'autre sens.

Lorsque la tension est positive, le courant correspondant à la voie 9 360 Å parcourt l'enroulement d'un relais sensible dans le sens convenable ; lorsque cette tension est négative l'autre demi-triode débite et le courant correspondant à la voie 8 600 Å traverse le relais en sens opposé.

Pour le fonctionnement correct de ce dispositif électronique, il est indispensable que les signaux donnés par le photomultiplicateur soient rigoureusement déphasés de 180° c'est-à-dire que les faisceaux de lumière parallèle

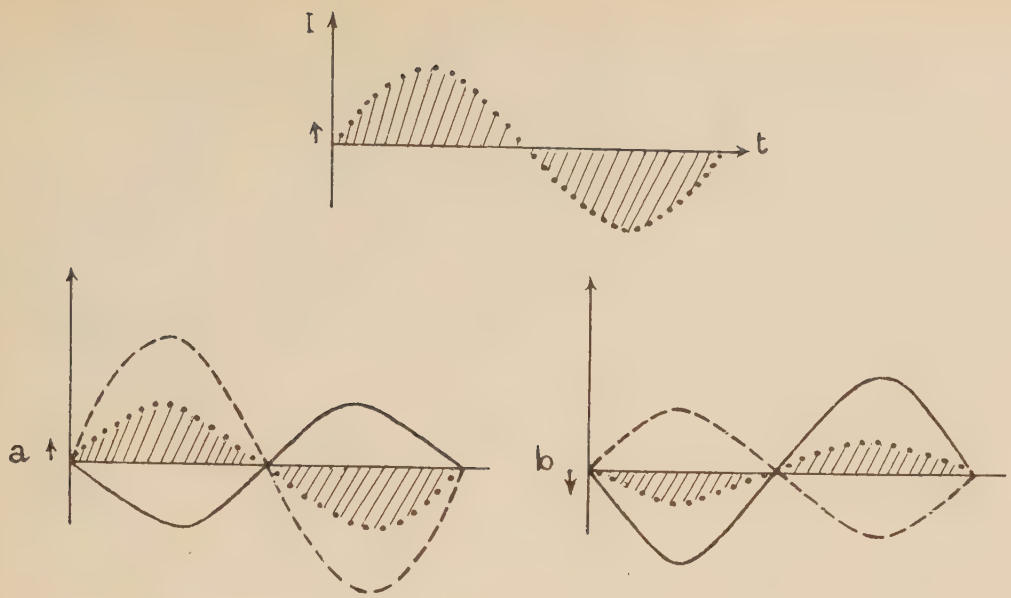

Fig. 14

composant les deux voies soient eux-mêmes déphasés de π. Pour cela, on a placé sur le parcours des deux voies un système de volets réglables de manière à obtenir la forme géométrique et le déphasage convenable des deux faisceaux tombant sur le photomultiplicateur : le réglage précis étant effectué à l'aide d'un oscilloscope.

7/ Liaison relais-moteur.

Le courant issu du discriminateur ECC 40 est envoyé dans un relais galvanométrique (RG) sensible du type 911 295 "Sensitact" dont la puissance maximale de commande est de 30 milliwatts et la sensibilité de 0,02 mA pour une déviation de 5 grades. Un dispositif de deux résistances et un potentiomètre reliant respectivement les deux cathodes de la double triode ECC 40 avec la masse permettent d'annuler le courant résiduel dû à la dissymétrie de la double triode quand l'appareil est à l'équilibre et d'amener ainsi le relais au zéro (voir figure 13).

Le pouvoir de coupure de ce relais étant insuffisant pour commander directement un moteur, il est nécessaire de lui adjoindre deux relais secondaires : ces relais secondaires sont des relais Servo-contact type AA alimentés sous 110 volts courant alternatif, avec un pouvoir de coupure de 1 ampère sous 110 volts.

Lorsque l'éclairement reçu par le photomultiplicateur varie (variation de la vapeur d'eau) on obtient dans (RG) le contact en (a) ou (b) (figure 15), suivant le sens de cette variation. Ce contact détermine l'enclenchement sur la position T d'un des deux relais (RS) l'autre restant sur la position R. Le moteur est alors mis sous tension, le courant traversant ses enroulements (M_1) et (M_2) en série avec le secteur, suivant le trajet d, c, b, a par exemple (cas du contact b) ; le coin se déplace alors devant la voie non absorbante et le courant varie jusqu'à l'équilibre de (RG) (à l'équilibre, aucun contact n'est établi). Dans le cas du contact (a) les enroulements M_1 et M_2 sont parcourus suivant c, d, b, a d'où la rotation du moteur et le déplacement du coin en sens opposé. A l'équilibre (RS_1) et (RS_2) sont sur la position R ; un interrupteur, convenablement placé dans le circuit du moteur et commandé par le coin, permet de couper l'alimentation du moteur, quand ce coin atteint son déplacement limite de chaque côté.

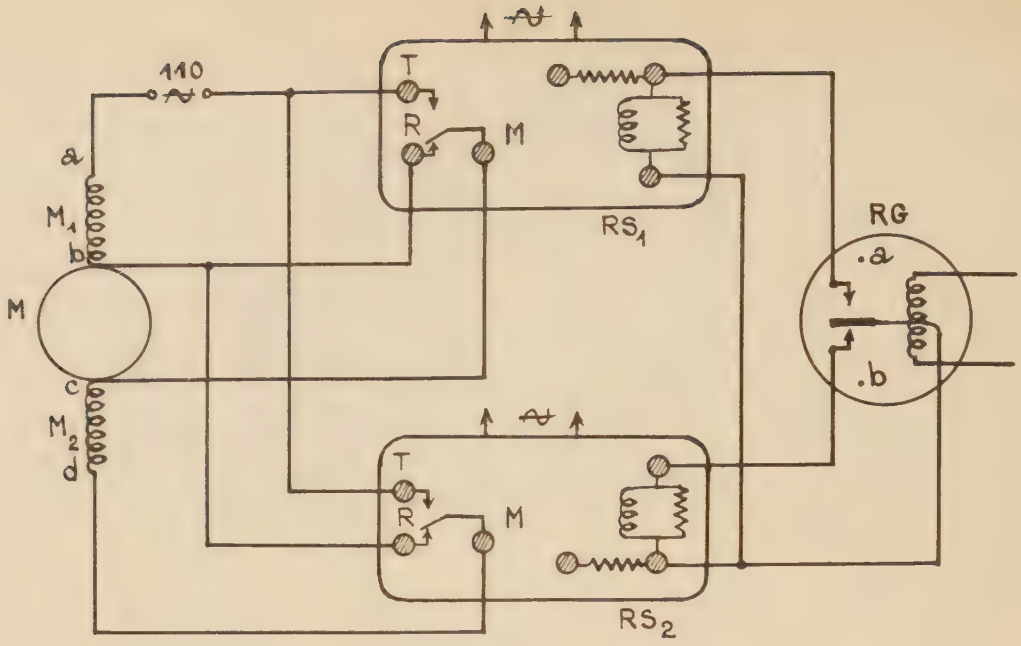

Fig. 15

8/ Stabilité et fidélité de la partie électronique.

Les problèmes qui nous intéressent sont les suivants :

a) Stabilité de la fréquence de modulation du signal ;

b) Insensibilité de l'appareil vis-à-vis des variations d'énergie lumineuse, en l'absence de variation de vapeur d'eau.

a) Stabilité de la fréquence de modulation du signal.

Nous avons dit précédemment que l'énergie lumineuse captée par l'appareil était modulée à une fréquence de 520 Hz. Cette modulation est réalisée au moyen d'un disque à créneaux, entraîné par un moteur électrique, lequel est alimenté par la tension du réseau alternatif sous une fréquence de 50 Hz. Ce moteur est du type asynchrone à cage d'écureuil à phase auxiliaire, dont la vitesse de rotation est directement fonction de la fréquence du courant d'alimentation et dans une certaine mesure de l'amplitude de la tension d'alimentation. En effet, dans ce type de moteur l'angle de glissement varie d'une manière assez importante en fonction de l'amplitude de la tension d'alimentation. Pour mettre ce fait en évidence, nous avons alimenté le moteur sur le réseau alternatif 50 Hz à travers un dispositif permettant de faire varier d'une façon continue la tension d'alimentation du moteur en même temps que l'on mesurait au moyen d'un stroboscope la vitesse de rotation du disque modulateur. Cette vitesse de rotation, exprimée en tours/sec et multipliée par le nombre de créneaux, donne la fréquence de modulation. Les expériences effectuées montrent que pour une tension d'alimentation variant entre 95 et 105 volts efficaces, la fréquence du signal de modulation reste sensiblement constante. Le problème a donc été résolu en ramenant l'amplitude de la tension d'alimentation du moteur à une valeur moyenne de 100 volts efficaces en interposant entre la source et le moteur une résistance ohmique de valeur convenable.

b) Influence des variations du niveau d'énergie lumineuse.

Nous devons pouvoir mesurer les variations de quantité de vapeur d'eau en prenant comme source d'énergie soit le Soleil, soit la Lune ; d'autre part, pour une même source d'énergie, il y a pour un enregistrement de longue durée une variation d'énergie causée par la variation de la masse d'air. Il est

donc important pour la précision de la mesure effectuée, que ces variations de niveau d'énergie restent sans effet sur le fonctionnement de l'appareil et que les changements d'équilibre du système d'enregistrement ne soient dûs qu'à la seule variation de la quantité de vapeur d'eau.

Pour vérifier ce fait au laboratoire, nous avons procédé comme suit : la source d'énergie est une lampe à incandescence à ruban de Tungstène alimentée en courant continu sous une tension de 6 volts et une intensité de 10 Ampères. Cette lampe à ruban a été choisie parce que fonctionnant sous une forte intensité elle présente une grande stabilité d'éclairement. Cette source, placée au foyer d'une lentille convergente (f = 100 mm), fournit donc un faisceau de lumière parallèle que l'on place dans l'axe du système optique d'entrée de l'appareil de mesure de vapeur d'eau. Après un temps de fonctionnement suffisant (environ 3/4 d'heure) pour que l'ensemble, source-appareil de mesure, prenne une stabilité suffisante, nous avons fait varier le niveau d'énergie capté par l'appareil en interposant entre la source et l'appareil un filtre affaiblissant de valeur connue. L'enregistrement effectué (figure 16) en disposant des filtres affaiblissants de valeurs diverses (indiquées au tableau I) montre que, malgré des variations importantes du niveau d'énergie captée par l'appareil, il n'y a pas de variations sensibles du niveau d'enregistrement. Autrement dit, l'équilibre du système reste stable et accuse une déviation maximale ± 1,5 mm dans un intervalle de densité optique du filtre affaiblissant de 1,28 à 3,48, soit un rapport d'énergie donné par :

$$\log \frac{E_2}{E_1} = 2,7 \qquad \text{soit} \qquad \frac{E_2}{E_1} \simeq 500.$$

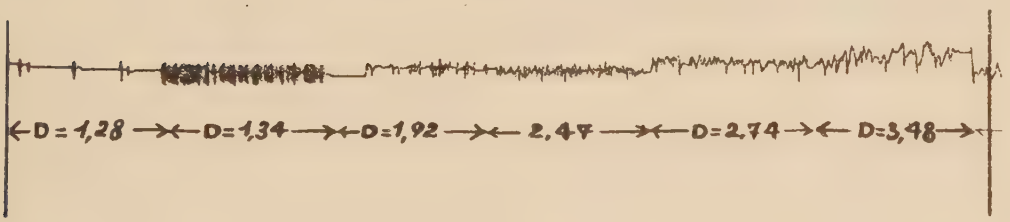

Fig. 16

Le même enregistrement a été effectué en prenant comme source d'énergie le Soleil et en remplaçant le filtre interférentiel centré sur 9 360 Å par un filtre centré sur 8 600 Å (ceci pour supprimer le rôle de la variation de vapeur d'eau) ; nous avons donc enregistré l'influence d'une variation de niveau d'énergie due à un affaiblissement de la masse d'air : le résultat concorde avec le précédent et vérifie bien le fait que le fonctionnement de l'appareil n'est pas influencé par les variations de niveau d'énergie.

IV - MISE EN STATION DE L'APPAREIL ET PRECAUTIONS NECESSAIRES -

1/ Mise en station de l'appareil.

Son horizontalité est vérifiée à l'aide de deux niveaux perpendiculaires entre eux, l'appareil étant manœuvré à l'aide de vérins. Pour faciliter la mise en station, nous avons décidé une fois pour toutes de placer l'axe optique de l'instrument dans la direction NS, le centre du miroir de l'héliostat étant situé à 70 cm de la lentille de champ du récepteur.

2/ Précautions nécessaires.

MESURES DIURNES

a) Lumière ambiante.

Il est actuellement nécessaire d'assurer une étanchéité rigoureuse de l'appareil à la lumière ambiante, principalement pour les mesures de jour, les précautions nécessaires ont été prises dans ce cas.

b) Echauffement de la partie électronique.

On sait que l'échauffement de la partie électronique a pour conséquence l'augmentation du bruit de fond, inconvénient d'autant plus grave que le capteur d'énergie est un photomultiplicateur. En plus de la protection contre le rayonnement solaire direct, il est nécessaire de réfrigérer l'enceinte contenant le photomultiplicateur.

MESURES NOCTURNES

a) Condensation de la vapeur.

La condensation de la vapeur d'eau pendant la nuit sur le miroir du sélénostat est un inconvénient grave, car cette condensation provoque une diffusion importante du rayonnement réfléchi ; une source de chaleur placée sous le miroir élimine cet inconvénient.

b) Contrôle du réglage du sélénostat.

Le contrôle de la poursuite de l'astre par sténopé s'avérant délicat (faible éclairement) pendant la nuit, un système annexe est installé à cet effet : il consiste en un petit miroir solidaire du tube d'entrée. L'image réfléchie de la Lune est reprise par une petite lunette à réticule placée à 140 cm du miroir sur un support fixe ; le réglage est correct lorsque l'image de la Lune se trouve à la croisée des fils du réticule.

CHAPITRE II

ETALONNAGE

On peut relier les variations de la quantité d'eau condensable contenue dans l'atmosphère aux déplacements du coin photométrique. Il est donc nécessaire de procéder à l'étalonnage de l'appareil, c'est-à-dire de faire correspondre aux différentes positions du coin les épaisseurs d'eau condensable correspondantes. Nous allons étudier les différentes méthodes possibles pour réalier cet étalonnage.

I - METHODES D'ETALONNAGE -

Deux procédés sont possibles :

1/ L'étalonnage basé sur les propriétés thermodynamiques des systèmes fermés.

2/ L'étalonnage basé sur les propriétés thermodynamiques des systèmes ouverts.

1/ Etalonnage en système fermé.

Un long tube fermé à ses deux extrémités par deux fenêtres transparentes peut être mis en relation d'une part avec un manomètre et d'autre part, soit avec une pompe à vide, soit avec une ampoule contenant de l'eau. On entoure le tube avec un fil résistant permettant de le porter à une température convenable. Un faisceau de lumière parallèle provenant d'une lampe à ruban de Tungstène alimentée sous intensité constante traverse le tube d'une extrémité à l'autre. A la sortie il est envoyé dans l'appareil de mesure. En faisant le vide dans le tube, on peut enregistrer la position du coin photométrique correspondant à une épaisseur nulle d'eau condensable. On admet dans le tube une quantité d'eau distillée suffisante pour que, à la plus haute température que l'on se propose d'atteindre, il y ait encore présence de la phase liquide. En chauffant le tube à différentes températures, et à différentes pressions, on enregistre les positions du coin photométrique correspondantes. Avec les données du manomètre et du thermomètre et grâce au tableau de la pression saturante de la vapeur d'eau, on peut calculer l'épaisseur d'eau condensable traversée par le faisceau de lumière. Cette méthode a été utilisée par A. et E. Vassy [28] pour étalonner l'appareil de vapeur d'eau à lecture directe.

2/ Etalonnage en système ouvert.

Si l'on veut étalonner l'appareil à l'air libre, on se heurte à plusieurs difficultés :

a) L'épaisseur d'eau condensable contenue dans la basse atmosphère au niveau du sol est telle qu'il faut un parcours absorbant de l'ordre de un kilomètre pour avoir une quantité comparable à celle de l'atmosphère entière. Dans ces conditions, il devient difficile d'avoir une intensité lumineuse suffisante pour utiliser avec précision l'appareil.

b) Si l'on opère sur des parcours absorbants de longueurs croissantes, l'épaisseur d'eau condensable est susceptible de varier au cours de l'étalonnage.

Parmi les méthodes citées ci-dessus, nous avons choisi la méthode de l'atmosphère libre, ceci pour éviter d'une part, les difficultés de mesures dues à l'emploi d'un tube et d'autre part, pour nous placer dans les conditions réelles où sont effectuées les mesures de l'épaisseur d'eau contenue dans l'atmosphère et qui correspondent à la définition de la thermodynamique des systèmes ouverts [45].

L'étalonnage consistera alors à effectuer un enregistrement continu des variations de l'épaisseur réduite d'eau condensable au cours d'une journée météorologiquement stable, ce qui peut se faire en mesurant ou calculant les variations correspondantes de la hauteur du Soleil ou de la Lune, qui donnent les variations des masses d'air. Connaissant d'après les radiosondages, la distribution verticale de la vapeur d'eau on peut calculer l'épaisseur réduite de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère et déterminer la valeur correspondant à chaque point de l'enregistrement obtenu.

II - METHODE DE CALCUL DE L'EPAISSEUR D'EAU CONDENSABLE A PARTIR D'UN RADIOSONDAGE -

Par exemple, si l'on connaît à l'aide d'un sondage la répartition de la vapeur d'eau en altitude, il est facile de calculer pour chaque altitude h la quantité dW de vapeur d'eau contenue dans une tranche d'épaisseur dh. Par intégration, on en déduit la masse totale W de l'épaisseur d'eau condensable contenue à la verticale du lieu d'observation (l'erreur commise en assimilant le sondage réel à un sondage rigoureusement vertical est négligeable, car les éléments météorologiques varient en général lentement avec les coordonnées horizontales).

Considérons depuis la surface de la terre en direction du zénith une colonne d'air de 1 cm^2 de section droite. Supposons que l'atmosphère soit homogène, on découpe cette atmosphère en une série de tranches horizontales ; la masse de vapeur contenue dans chaque tranche entre l'altitude h_1 et h_2 sera :

$$W = \int_{h_1}^{h_2} \rho_e \, dh \tag{14}$$

où ρ_e est l'humidité absolue et s'exprime habituellement en grammes par mètre cube.

En introduisant l'équation d'état pour la vapeur d'eau on a :

$$f \frac{M_e}{\rho_e} = RT \tag{15}$$

où f désigne la pression de la vapeur d'eau, M_e la masse moléculaire de la vapeur d'eau, R la constante des gaz parfaits pour la molécule gramme et T la température absolue. En reliant (14) et (15) on obtient :

$$W = \frac{M_e}{R} \int_{h_1}^{h_2} f \frac{dh}{T} \tag{16}$$

Nous savons qu'un sondage donne les valeurs de la pression P, de la température T et de l'humidité relative U, en des points d'une ligne que l'on considère pratiquement comme verticale et instantanée.

Pour l'intégration de l'épaisseur, nous avons utilisé trois données : h (l'altitude géopotentielle), T (la température) et U (l'humidité relative) correspondant à chaque altitude. Pour évaluer ρ_e on a utilisé les valeurs de l'humi-

dité absolue à la saturation ρ_{es} en fonction de la température dont elle dépend uniquement [46]. Puis à l'aide de la relation $U = \frac{\rho_e}{\rho_{es}}$ on peut déduire la valeur de ρ_e correspondant à chaque altitude.

L'épaisseur réduite de la vapeur d'eau obtenue par la méthode d'intégration citée ci-dessus nous donnera l'épaisseur de la quantité d'eau condensable contenue dans une colonne d'air et supposée ramenée toute entière à l'état liquide.

L'intégration a été faite jusqu'à l'altitude pour laquelle la température atteint - 40°C (ρ_{es} négligeable). Nous donnerons à titre d'exemple le résumé d'une intégration faite d'après le radiosondage du 15 août 1962 à Oh TU (tableau 3).

Tableau III

h m	T°C	ρ_{es} gr/m³	U %	ρ_e gr/m³	ρ_{em} gr/m³	Δh m	Δw cm
167	+ 16,2	13,87	88	12,20			
350	16,5	14,23	73	10,38	11,29	183	0,206
1 030	13	11,35	58	6,58	8,49	680	0,577
1 170	13,6	11,78	43	5,06	5,82	140	0,081
2 120	10,8	9,88	10	0,98	3,02	950	0,286
3 670	0,4	5,00	30	1,50	1,24	1 550	0,192
4 180	- 1,4	4,38	10	0,43	0,96	510	0,048
5 730	- 12,2	1,99	10	0,19	0,31	1 550	0,048
6 840	- 20,2	1,05	29	0,30	0,24	1 110	0,026
7 996	- 22,9	0,83	30	0,24	0,27	556	0,015
9 910	- 40	0,14	21	0,03	0,13	2 514	0,032
						épaisseur totale	1,51

Pour avoir l'épaisseur d'eau condensable de l'atmosphère suivant la verticale, il faut diviser l'épaisseur de la vapeur d'eau qui se trouve sur le trajet des rayons solaires (indication donnée par l'appareil) par la masse d'air traversée. On peut connaître cette masse d'air à chaque instant en mesurant la distance zénithale à l'aide d'un sextant, d'après les données de Bemporad [47] ou Linke [48]. On peut aussi la calculer par la formule :

$$\cos Z = \cos \delta . \cos H . \cos \lambda + \sin \delta . \sin \lambda \qquad (17)$$

où Z est la distance zénithale, δ la déclinaison, λ la latitude et H l'angle horaire (temps vrai) de l'astre au lieu considéré.

Il ne faut pas opérer pour des distances zénithales trop grandes car la masse d'air ne peut alors être confondue avec sec Z et surtout parce que l'absorption par la vase atmosphérique devient assez importante pour introduire des difficultés.

III - COURBE D'ETALONNAGE -

Nous avons donc enregistré les variations de l'épaisseur d'eau condensable en même temps que l'on effectue un radiosondage au cours d'une journée stable. Après l'intégration de l'épaisseur obtenue par radiosondage, on peut

évaluer la quantité de vapeur d'eau correspondant à chaque instant à l'enregistrement donné par l'appareil, ceci en multipliant par la masse d'air correspondante le résultat donné par le radiosondage. Par cette méthode nous avons obtenu différents points à l'aide desquels nous avons tracé la courbe d'étalonnage (figure 17). Pour éviter les inconvénients cités plus haut (variation de la quantité totale de vapeur au cours de l'étalonnage) et par suite de la nécessité d'avoir une atmosphère homogène pendant cet étalonnage, on est amené à opérer pendant plusieurs journées et nuits afin d'obtenir des résultats cohérents.

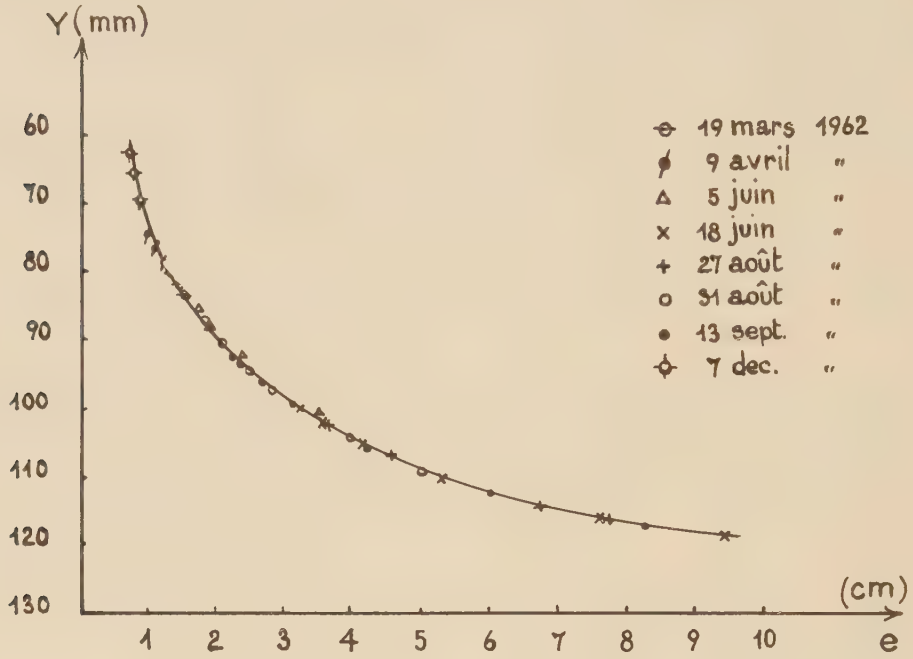

Fig. 17

La courbe d'étalonnage a été établie avec différentes quantités de vapeur d'eau ainsi que différentes masses d'air. La figure 17 montre un groupe de résultats obtenus soit au cours de la journée, soit au cours de la nuit, d'après lesquels il a été possible de tracer la courbe d'étalonnage.

Nous avons porté en abscisses l'épaisseur d'eau condensable (en centimètres) contenue dans la totalité de l'atmosphère sur le trajet du rayonnement et en ordonnées les positions enregistrées du coin photométrique y, le début de l'échelle choisie correspondant à la limite inférieure du papier enregistreur. D'après cet étalonnage, pour obtenir l'épaisseur d'eau condensable dans la direction du zénith, c'est-à-dire pour la masse d'air unité, il suffit de diviser la valeur de cette épaisseur obtenue sur la courbe d'étalonnage pour une certaine position du coin, par la masse d'air correspondante à l'instant de la mesure ; le tableau suivant (4) permet de déterminer l'épaisseur de la vapeur d'eau en fonction de la position du coin photométrique.

Tableau IV

Y_{mm}	e_{cm}	Y_{mm}	e_{cm}	Y_{mm}	e_{cm}	Y_{mm}	e_{cm}
60	0,65	77	1,16	94	2,45	111	5,65
61	0,66	78	1,21	95	2,55	112	6,00
62	0,67	79	1,27	96	2,65	113	6,25
63	0,70	80	1,32	97	2,80	114	6,75
64	0,72	81	1,40	98	2,95	115	7,25
65	0,74	82	1,47	99	3,10	116	7,75
66	0,76	83	1,52	100	3,25	117	8,25
67	0,78	84	1,58	101	3,40	117,5	8,65
68	0,80	85	1,65	102	3,60	118	9,00
69	0,85	86	1,75	103	3,77	118,5	9,45
70	0,89	87	1,80	104	3,95	119	9,90
71	0,92	88	1,90	105	4,12	119,5	10,30
72	0,95	89	2,00	106	4,35	120	10,75
73	1,00	90	2,05	107	4,52	120,5	11,30
74	1,05	91	2,15	108	4,80	121	12,00
75	1,10	92	2,25	109	5,00		
76	1,12	93	2,35	110	5,30		

IV - COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS -

Après l'étalonnage de l'appareil, il nous a semblé nécessaire de comparer les résultats obtenus avec notre appareil et avec les radiosondages. Pour cela, nous avons porté en abscisses la valeur de la quantité de vapeur d'eau mesurée par notre appareil et en ordonnées les résultats de sondages effectués à l'instant correspondant.

Pour une vérification complète de cette comparaison, nous avons choisi différents jours ou nuits avec différentes situations météorologiques. La figure 18 montre que la courbe est une droite à 45° et l'accord entre les résultats obtenus par les radiosondages et l'appareil sont concordants, la dispersion des points étant très faible.

Quelques points (1, 2, 3, 4, 5, 6) non situés sur la droite montrent que les valeurs obtenues par les sondages sont supérieures à celles données par l'appareil. Si l'on examine la situation météorologique correspondant aux sondages effectués, on constate que les écarts les plus grands correspondent justement aux jours et aux nuits instables au point de vue météorologique (formation nuageuse).

Dans le cas du radiosondage, les erreurs qui faussent les résultats sont les suivantes :

1/ Quand la radiosonde traverse une couche nuageuse, on constate une augmentation parfois considérable de la quantité de vapeur d'eau (1, 2 et 3) et même une saturation (4, 5, 6). Par exemple les sondages du 13 juillet 62 à Oh TU, du 18 juillet 62 à 12h TU et du 9 août 62 à 12h TU correspondant successivement aux points 4, 5 et 6 ont montré que les sondes ont traversé des couches saturées de vapeur d'eau (U = 100 %) : pour le 13 juillet entre les altitudes géopotentielles 360 et 1 100 mètres, pour le 18 juillet entre les altitudes 960 et 2 780 mètres et enfin pour le 9 août entre 1 370 et 2 440 mètres.

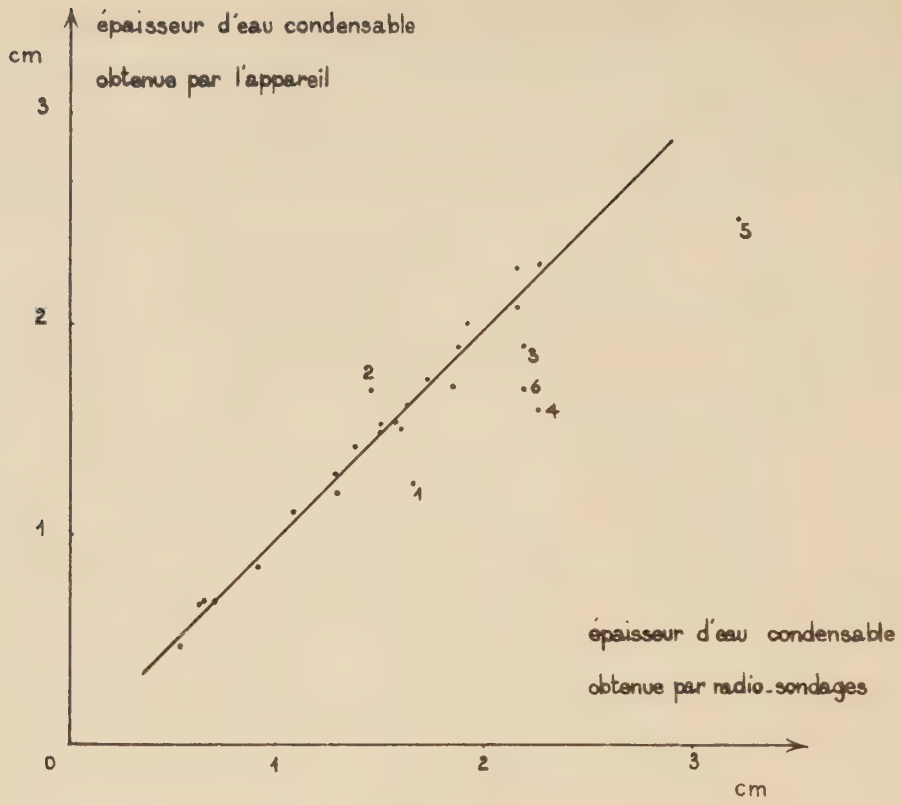

Fig. 18

Donc les intégrations faites à l'aide de ces sondages représentent des épaisseurs d'eau condensable plus élevées et qui ne correspondent pas aux valeurs réelles que nous avons mesurées avec notre appareil.

2/ Dans la traversée d'un nuage, le fait que l'élément actif de l'hygromètre (peau de batteur d'or) soit mouillé, risque de produire un malencontreux phénomène de traînage.

3/ Une autre cause d'erreur dans le radiosondage est le cas des sursaturations : l'hygromètre ne peut donner plus de 100 % alors que la mesure par absorption donne la quantité exacte de vapeur d'eau. On voit donc que le fait de mesurer la quantité de vapeur sur le trajet du rayon solaire ou de la Lune en l'absence de nuages sur ce trajet est différent du cas du radiosondage traversant les couches nuageuses.

Un des avantages de notre appareil est de donner la possibilité de faire des enregistrements continus de l'épaisseur d'eau condensable et d'étudier les variations de cette épaisseur au cours du temps, ce qui nous conduit à étudier plus particulièrement les phénomènes de condensation de la vapeur d'eau au moment du coucher du Soleil et durant la nuit et ceci d'une manière continue, beaucoup plus précise qu'au moyen des radiosondages ou des autres instruments cités plus haut.

V - PRECISION DE L'APPAREIL -

On sait que toute mesure effectuée au moyen d'un appareil est entachée d'une certaine erreur qui dépend à la fois des différents éléments constituant

cet appareil et des calculs nécessaires à la détermination de son étalonnage. Après la discussion faite au paragraphe précédent, (comparaison des résultats obtenus), nous allons étudier et déterminer l'erreur qui affecte les mesures données par l'appareil. Pour obtenir l'épaisseur d'eau condensable suivant la verticale, il faut diviser les indications obtenues par l'appareil à chaque instant, par la masse d'air correspondante. On verra que dans cette opération deux facteurs interviennent. Soit e la quantité totale de la vapeur d'eau obtenue par l'appareil suivant le trajet du rayon, M la masse d'air correspondante et W l'épaisseur d'eau condensable suivant la verticale ; on obtient :

$$e = W.M$$

et le maximum de l'erreur relative sera :

$$\left|\frac{\Delta W}{W}\right| = \left|\frac{e}{e}\right| + \left|\frac{\Delta M}{M}\right| \qquad (18)$$

1/ Erreur sur la masse d'air.

On sait que la masse d'air est reliée par la formule $M = \rho \sec Z$ à la distance zénithale. Pour mesurer la distance zénithale nous avons utilisé un sextant donnant les degrés et les minutes ; l'erreur maximale probable étant de l'ordre de ± 1 minute pour toutes les mesures possibles, elle pourra être négligée.

2/ Erreur sur l'enregistrement donné par l'appareil.

Le dispositif électronique employé possède un bruit de fond qui a pour conséquence de superposer aux variations enregistrées par l'appareil et dues à la vapeur d'eau des fluctuations qui créent une incertitude dans l'évaluation exacte de la position du coin et en conséquence, dans la mesure réelle de l'épaisseur d'eau condensable. On peut envisager ici une erreur maximale de ± 1 mm quelle que soit la position du coin ; comme la courbe d'étalonnage n'est pas une droite, il nous sera indispensable de calculer $\frac{\Delta e}{e}$ correspondant à chaque valeur de e (tableau V).

Tableau V

Y_{mm}	e_{cm}	$\frac{\Delta e}{e}$ %	Y_{mm}	e_{cm}	$\frac{\Delta e}{e}$ %
65	0,74	2,6	95	2,55	4
70	0,89	3,3	100	3,25	4,6
75	1,10	3,3	105	4,12	4,8
80	1,32	4,5	110	5,30	5,6
85	1,65	4,5	115	7,25	6,8
90	2,05	5	120	10,75	8

Nous avons tracé la courbe de la variation de l'erreur relative en fonction de l'épaisseur d'eau condensable mesurée (figure 19). On voit sur cette figure que l'erreur relative calculée varie entre 4 et 8 % pour les différentes valeurs de l'épaisseur d'eau condensable comprises entre 0,8 et 10,75 cm. Si l'on suppose que la valeur moyenne observée dans la région où les mesures ont été effectuées est 1,5 cm et si l'on effectue les mesures jusqu'à une distance zénithale de 75° qui correspond à une masse d'air de l'ordre de 4, on ne dépasse pas la valeur de 6 cm pour l'épaisseur d'eau condensable ce qui correspond à une erreur relative maximale inférieure de 6 %. Donc on peut admettre que :

$$\left|\frac{\Delta W}{W}\right|_{\text{maximale}} \leqslant 6\ \%$$

Les figures 20 et 21 représentent deux enregistrements, l'un effectué avec le Soleil (16 octobre 1962), l'autre avec la Lune (12 septembre 1962).

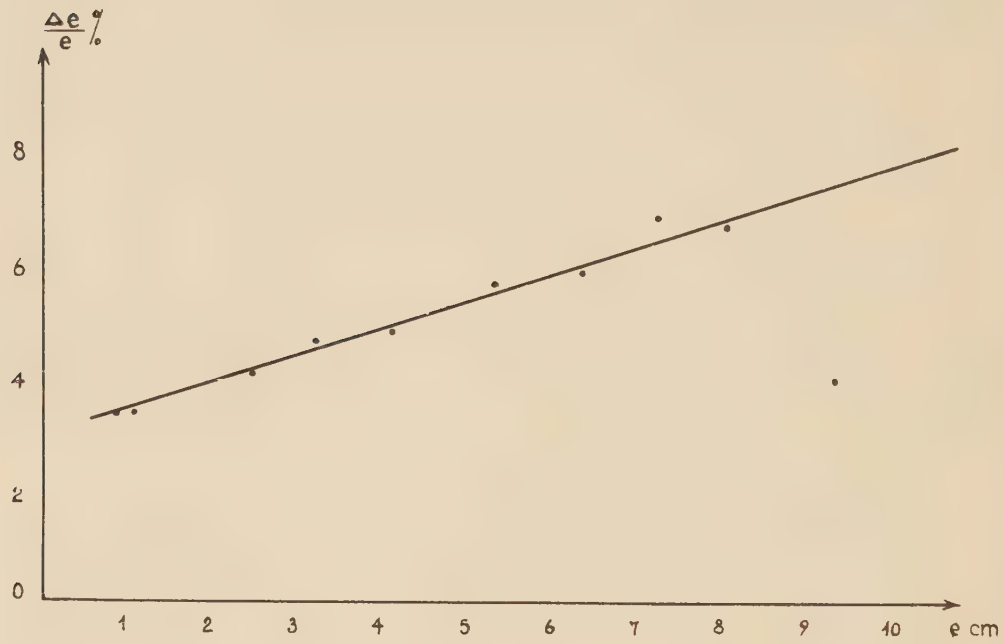

Fig. 19

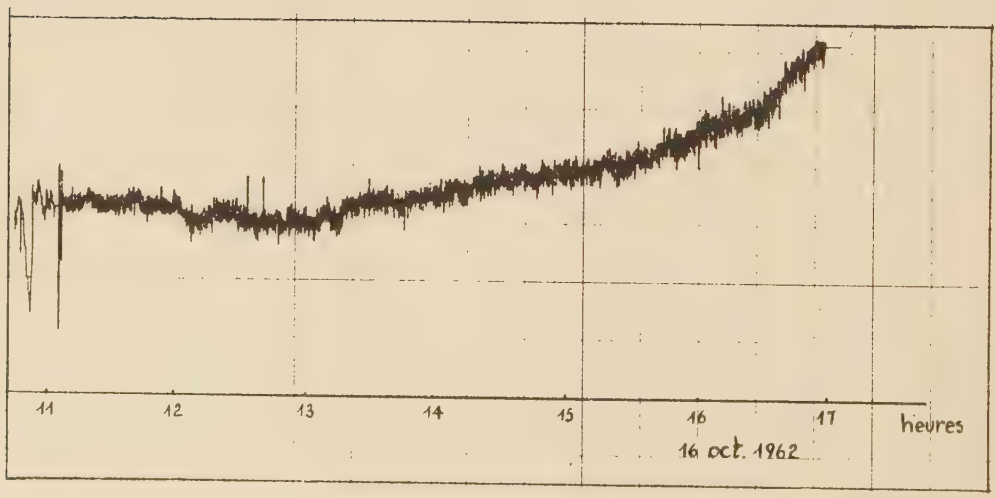

Fig. 20

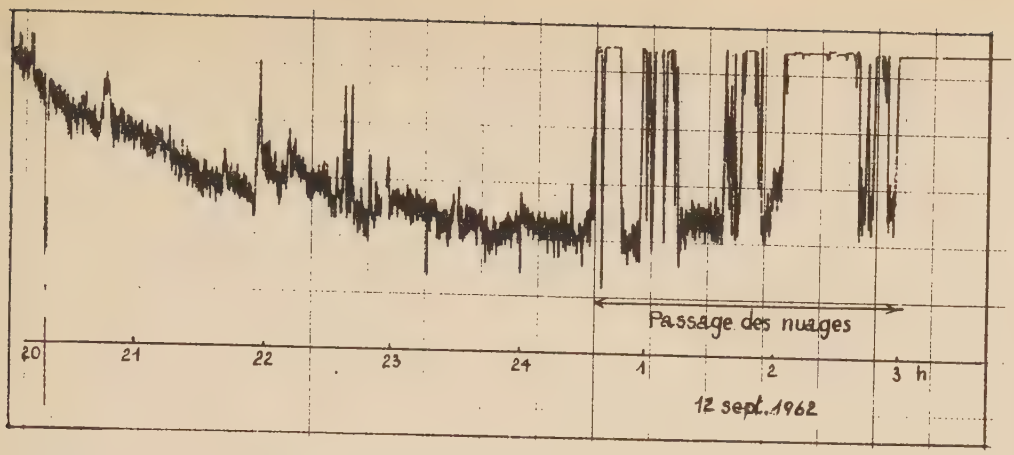

Fig. 21

CHAPITRE III

ÉTUDE DES VARIATIONS DE L'ÉPAISSEUR D'EAU CONDENSABLE

Parmi les constituants de l'air, la vapeur d'eau présente la particularité de faire partie d'un cycle d'évolution ; en effet, la concentration de la vapeur dépend à la fois de sa propre vitesse de formation et de la condensation, ou bien, d'un apport extérieur dans la région de l'atmosphère considérée. Mais elle a de plus une influence très importante sur l'état de l'atmosphère.

La vapeur d'eau intervient évidemment en premier lieu dans la formation des nuages et des précipitations, mais son rôle ne se limite pas là, car elle absorbe en partie le rayonnement solaire et le rayonnement terrestre et joue par suite un rôle capital dans les échanges thermiques de l'atmosphère. La vapeur d'eau est le seul constituant de l'Atmosphère qui, suivant les conditions météorologiques, puisse se trouver en équilibre avec une phase condensée. La vapeur d'eau dispersée dans l'atmosphère devient facilement saturante du fait de la décroissance de la température en altitude : elle peut donc subir une condensation ; ainsi que nous l'avons dit auparavant notre but est d'étudier les variations d'amplitude de la vapeur d'eau au cours de la journée, principalement durant la nuit, en raison de la condensation.

Outre l'imperfection et la fragilité des hypogromètres, l'inconvénient majeur des procédés de dosage de la vapeur d'eau atmosphérique par sondages aérologiques réside dans les calculs laborieux auxquels ils aboutissent. On obtient des résultats aussi précis et beaucoup plus rapides par un procédé indirect d'observation basé sur la mesure de l'énergie solaire absorbée par la vapeur d'eau dans l'infra-rouge, c'est pourquoi nous avons mis au point un appareil plus complet basé sur ce principe.

Le seul reproche qu'on puisse adresser aux méthodes spectroscopiques de dosage de la vapeur d'eau atmosphérique est qu'il interdit d'analyser la répartition de la vapeur d'eau en altitude ; il faut noter que l'intérêt scientifique est d'obtenir des connaissances sur le contenu total de la vapeur d'eau dans l'atmosphère et ses variations pour pouvoir étudier un certain nombre de phénomènes de physique atmosphérique, tels que les phénomènes d'absorption des rayonnements solaires et terrestres, l'absorption des ondes centimétriques et les variations de l'indice de réfraction de l'air, etc. Par la suite il sera toujours possible de réduire et de miniaturiser l'ensemble de l'appareil de façon à le rendre utilisable dans les sondages par ballon. Il sera alors possible de mesurer la répartition de la vapeur d'eau en altitude qui intéresse les météorologistes.

Un autre inconvénient réside dans le fait qu'il faut diriger constamment le rayonnement des sources extra-terrestres (Soleil-Lune) sur l'appareil. Cette difficulté peut être résolue grâce au pointeur solaire réalisé à la Station Scientifique du Val-Joyeux par M. Leroy [49] qui permet de diriger automatiquement le rayonnement solaire sur l'appareil. Il est bien évident que cette méthode de mesure sera beaucoup plus précise que celle des sondages avec hygromètre.

L'étude de la variation de la vapeur d'eau au cours du temps pose différents problèmes : quel est le mécanisme de cette variation, est-ce que ces variations sont régulières ou irrégulières, quelles sont les amplitudes du maxi-

mum et du minimum journalier, quelles sont les variations mensuelles de ces amplitudes, à quoi sont-elles dues, est-ce que les points des maxima et des minima sont fixes ou variables, à quoi sont dues les variations irrégulières ?

Nous avons mesuré les variations d'amplitude de la vapeur d'eau au cours de la journée et de la nuit dans différents cas, par beau temps ou par ciel partiellement nuageux. Voyons quels sont les résultats observés.

I - VARIATION JOURNALIERE DE L'EPAISSEUR D'EAU CONDENSABLE -

Comme nous l'avons déjà indiqué dans la première partie, c'est Fowle qui a le premier effectué des mesures de l'amplitude de la variation de la vapeur d'eau. P.R. Lejay [50] Gadre [51] A. et E. Vassy [52] et Bannon et Steele [53] l'ont mesurée par des méthodes différentes mais seulement au cours de la journée.

Nous avons tenté pour notre part d'étudier les mesures pour une journée complète (cycle de 24 heures). D'après l'étalonnage décrit auparavant, nous avons enregistré les variations non seulement au cours de la journée mais aussi, pour la première fois, pendant la nuit d'une façon continue. Enfin nous avons pu enregistrer pendant plusieurs journées consécutives les changements de ces amplitudes pour avoir la possibilité d'étudier les phénomènes connexes.

Comme l'appareil est basé sur les propriétés absorbantes de la vapeur d'eau et les sources choisies étant le Soleil et la Lune, les seules possibilités de mesure sont les jours ou les nuits stables au point de vue météorologique avec nébulosité nulle ou quasi nulle.

Les résultats obtenus d'après nos mesures montrent que l'épaisseur d'eau condensable varie non seulement au cours du temps d'un moment à l'autre mais d'un jour à l'autre. Dans l'ensemble des mesures effectuées, il y a celles où les variations sont nettement régulières et d'autres où nous avons constaté parfois des irrégularités considérables.

En ce qui concerne les variations régulières celles-ci ont lieu justement les jours pour lesquels l'atmosphère est calme et sans nuages (beau temps) ou peu nuageux, tandis que les variations irrégulières correspondent aux jours où l'on observe de nombreux nuages dans le ciel, c'est-à-dire pour des régions du ciel soumises à l'influence de masses d'air extérieures. Pour les variations irrégulières le tableau VI donne les valeurs obtenues pour les différentes heures de plusieurs journées.

Tableau VI

Heures	18 mai 1962	7 juin 1962	26 juin 1962	9 août 1962	17 oct. 1962
10h00		1,17 cm		1,47 cm	0,54 cm
10h30			1,35 cm		0,45
11h00		1,20	1,80	1,50	0,52
11h30				1,52	0,65
12h00		1,32	1,22	1,56	0,60
12h30			1,26	1,62	0,47
13h00		1,48	1,72	1,70	
13h30					0,62
14h00	2,32 cm	1,52		1,77	
14h30	1,62				
15h00		1,52		1,80	
16h00	1,47	1,45		1,87	
17h00	1,30	1,30		1,90	
18h00		1,68		1,95	

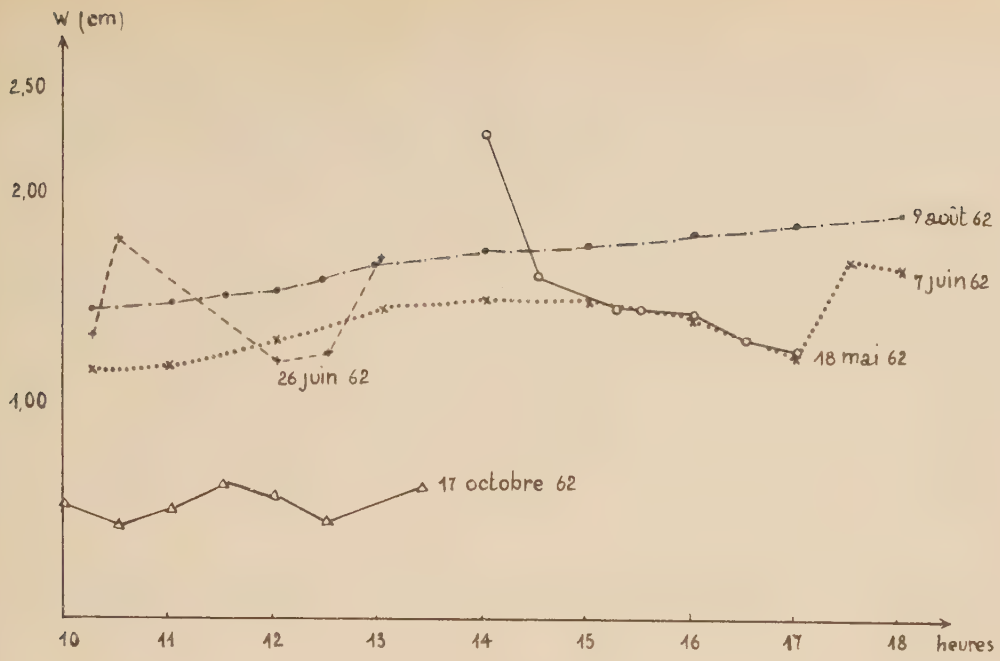

Fig. 22

La figure 22 montre ces variations au cours du temps.

En ce qui concerne les variations de l'amplitude de l'épaisseur d'eau condensable pour le 9 août 1962, la courbe montre une augmentation quasi régulière jusqu'à la fin de la journée tandis que celle du 7 juin subit des variations brusques à la fin de la journée. Pour le 18 mai 1962 avant 14h, la mesure était impossible à cause d'une épaisse couche de nuages. On constate, aussitôt après la disparition des nuages, que la quantité de vapeur d'eau est très élevée et décroît ensuite régulièrement. Pour les deux journées du 26 juin et du 17 octobre, on voit des variations rapides au cours du temps mais avec des amplitudes différentes ; on constate très bien qu'au mois de juin l'amplitude des fluctuations est beaucoup plus élevée que pendant le mois d'octobre par exemple.

Pour le 9 août 1962 (figure 22), nous avons étudié la situation atmosphérique de notre région : celle-ci montre qu'à partir du milieu de la journée notre région était sous l'influence d'une masse d'air chaude et humide venant de l'Atlantique ce qui se traduisait par une augmentation de l'épaisseur d'eau condensable alors que l'on aurait dû s'attendre à une diminution.

VARIATIONS REGULIERES

Voyons comment se passent les choses pour les variations régulières. Comme nous l'avons dit plus haut les variations régulières correspondent justement aux jours pour lesquels on trouve une situation météorologique stable (beau temps, très faible variation du vent etc.). Nous avons trouvé une allure générale des variations de l'épaisseur d'eau condensable pour notre région : elle consiste en une augmentation de la quantité de vapeur d'eau existant dans la totalité de l'atmosphère au cours de la journée ; celle-ci atteint un maximum au début de l'après-midi (figure 23) puis diminue régulièrement et tous les points se trouvent sur une courbe. Ceci confirme les résultats déjà anciens de A. et E. Vassy [52].

Ayant ainsi trouvé différents résultats pour les jours sans nuages et avec nuages, on peut constater que la situation atmosphérique joue un grand rôle dans l'amplitude des variations de l'épaisseur d'eau condensable.

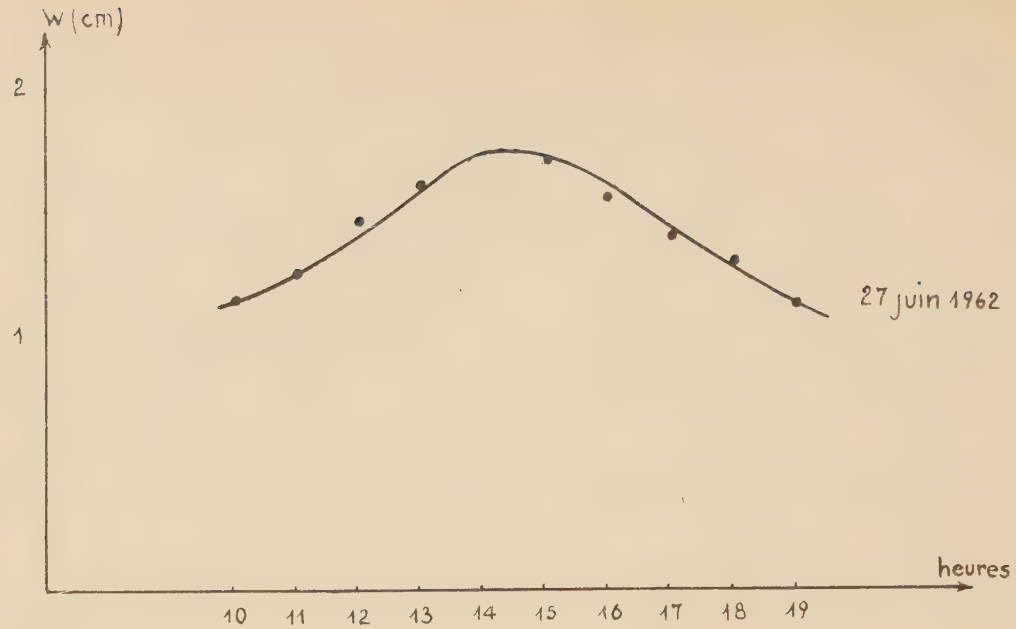

Fig. 23

Voyons pourquoi les variations ne sont pas régulières pendant les jours nuageux. On sait que pour obtenir la quantité totale de vapeur d'eau, on a :

$$W = \int_o^h \rho_e \, dh$$

où ρ_e dépend à la fois de la température T et de l'humidité U. Quand le ciel est nuageux ou quand la région est sous l'influence d'une masse d'air extérieure, les variations de T et U en altitude sont très rapides et très irrégulières, donc ρ_e dh varie rapidement. Dans ces conditions, les perturbations atmosphériques donnent naissance à des irrégularités de l'épaisseur d'eau condensable, tandis que, lorsque l'atmosphère est calme et le ciel dégagé et peu affecté par l'influence de masses d'air extérieures, on peut admettre que la répartition de l'humidité relative en altitude est régulière et ne varie pas beaucoup autour de sa valeur moyenne.

Dans ces conditions les variations de la quantité de la vapeur d'eau sont dues à la variation de la température ambiante et l'on doit constater une même allure pour la variation en fonction du temps de l'épaisseur d'eau condensable et pour la variation de la température.

VARIATIONS DE L'EPAISSEUR D'EAU CONDENSABLE POUR UN CYCLE DE 24 HEURES

Nous avons montré au paragraphe précédent les variations diurnes de l'épaisseur d'eau condensable et nous avons discuté sur les causes des variations régulières ou irrégulières. Pour étudier un cas déterminé, il nous semble préférable de parler des variations régulières correspondant à une situation atmosphérique stable, plutôt que celles en atmosphère perturbée.

Comme nous l'avons montré, il est d'un grand intérêt d'étudier les variations de la vapeur d'eau pour un cycle de 24 heures. Pour cela, nous avons mesuré ces variations à partir du début de la journée jusqu'au lendemain matin et pendant plusieurs journées consécutives. Le tableau (7) donne un groupe de valeurs obtenues pour les différentes heures de la journée et pour plusieurs jours.

Tableau VII

Heures	18 ⟶ 19 juin 62	11 ⟶ 12 août 62	12 ⟶ 13 sept. 62	13 ⟶ 14 sept. 62	14 ⟶ 15 sept. 62	15 sept. 62	7 ⟶ 8 déc. 62
6					0,67 cm	0,97 cm	
7					0,80	1,01	
8					0,87	1,00	
9					0,91	1,06	
10					1,05	1,28	
11			1,38 cm		1,18	1,36	
12		1,91 cm	1,56	1,56 cm	1,31		0,77 cm
13	2,36 cm	2,33	1,66	1,69	1,40		0,84
14	2,54	2,40	1,67	1,57	1,53		0,68
15	2,57	2,33	1,59	1,54	1,55		0,80
16	2,66	2,30	1,58	1,50	1,49		0,80
17	2,45	2,28	1,58	1,48	1,45		
18	2,33	2,15	1,50	1,50	1,42		0,64
19	2,18	1,91					0,67
20	1,95				1,28		0,59
21			1,32	1,37	1,38		0,56
22		1,50	1,27	1,20	1,36		0,50
23	1,75	1,49	1,27	1,15	1,30		0,51
0	1,61	1,37	1,12	1,05	1,25		0,50
1	1,50	1,30	1,04	0,96	1,20		0,48
2	1,26		0,96	0,96	1,16		0,42
3			0,81	0,88	1,10		
4				0,77	1,05		
5				0,66	0,95		
6				0,67	0,97		

Les figures 24 et 25 ont été tracées d'après ces valeurs en portant les heures en abscisse et l'épaisseur d'eau condensable en ordonnée.

La figure 24 donne les variations de la vapeur d'eau pour quatre journées prises pendant des mois différents. Elles sont destinées à montrer l'allure générale de ces variations journalières et mensuelles. En ce qui concerne les variations de l'amplitude au cours de la journée et pendant la nuit, on constate une augmentation au début de l'après-midi comme nous l'avons indiqué auparavant et ensuite une diminution régulière durant la nuit. On peut voir sur la figure 24 et sur le tableau 7 que les fluctuations de la vapeur d'eau au cours du temps pour les mois de l'été (18 juin et 11 août 1962) sont beaucoup plus élevées que celles de l'hiver (7 décembre). On voit aussi que les valeurs maximales et minimales ne sont pas les mêmes ; les amplitudes sont beaucoup plus élevées pendant l'été que pendant l'hiver ce qui traduit une variation saisonnière de la vapeur d'eau.

Pour compléter les mesures, nous avons montré sur la figure 23 les variations de la quantité de vapeur d'eau pour deux journées consécutives : celle

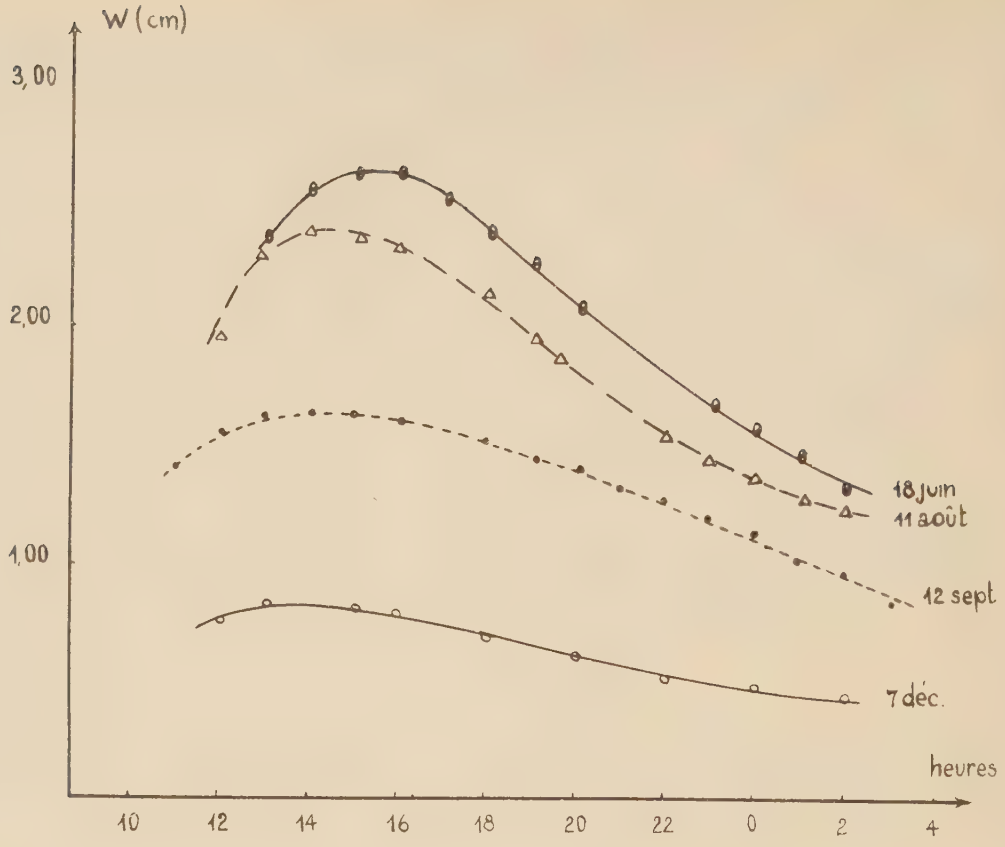
W (cm)
3,00
2,00
1,00
18 juin
11 août
12 sept.
7 déc.
heures
10
12
14
16
18
20
22
0
2
4

Fig. 24

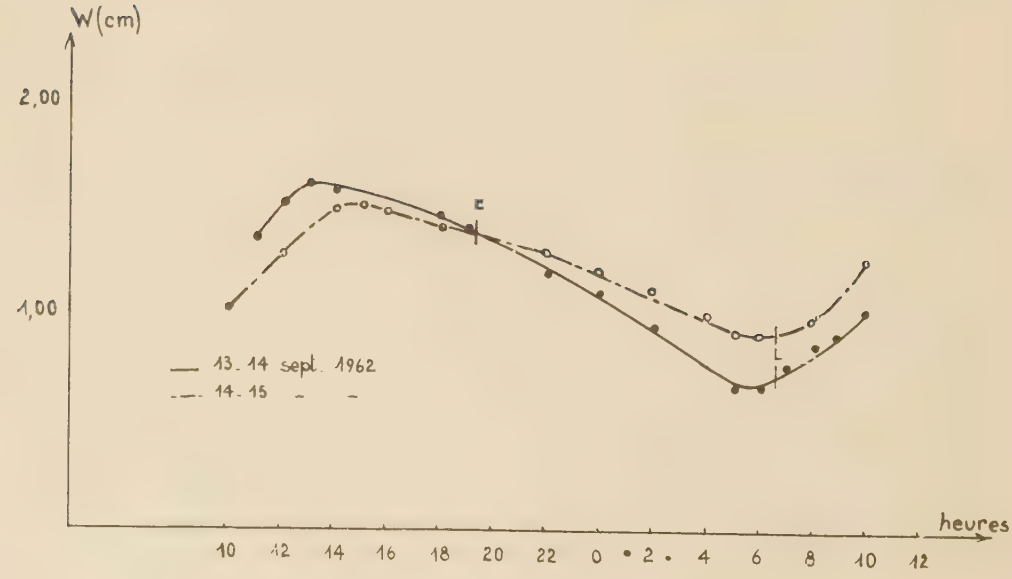
W(cm)
2,00
1,00
13. 14 sept. 1962
14. 15
heures
10
12
14
16
18
20
22
0
2
4
6
8
10
12

Fig. 25

du 13-14 et 14-15 septembre 1962. La figure 25 montre très bien l'allure générale de ces variations au cours d'un cycle de 24 heures.

On assiste tout d'abord à une diminution de la vapeur d'eau au cours de la nuit qui atteint une valeur minimale à peu près au moment du lever du Soleil [54], puis une augmentation, ensuite on voit que tous les points d'un cycle de 24 heures se placent bien sur une même courbe et que les variations de l'épaisseur d'eau condensable ne sont pas accidentelles ou aléatoires : elles obéissent à une loi de variation dont nous parlerons à propos du mécanisme de la variation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère.

On voit que le maximum de la vapeur d'eau pour le 14 septembre est moins élevé que celui du 13 septembre ce qui est justifié par une situation stable et non influencée par l'apport de masses d'air extérieures. On peut donc admettre une sècheresse relative. Le tableau 8 donne la valeur du maximum et du minimum pour une série de mesures ainsi que leurs rapports, en les comparant avec le rapport du minimum au maximum de la température observée au niveau du sol.

Parmi les données du tableau 8, celles du 12-13 août 1962 montrent une diminution très lente au cours de la nuit. Nous avons donc étudié la situation météorologique correspondante. La carte montre que notre région était alors sous l'influence d'un front chaud, ce qui expliquerait les faibles variations de la vapeur d'eau. En comparant les rapports des minima et maxima de la vapeur d'eau et ceux de la température, on voit qu'il se manifeste une étroite corrélation entre ces deux variables de l'atmosphère.

Tableau VIII

Dates	$W^{(cm)}$		minimum W	minimum T
	maximum	minimum	maximum W	maximum T
18 19 juin 62	2,66	1,26	0,46	0,55
11 12 août 62	2,40	1,35	0,52	0,42
12 13 août 62	1,90	1,45	0,76	0,60
13 14 août 62	2,25	1,39	0,62	0,60
12 13 sept. 62	1,67	0,81	0,48	0,52
13 14 sept. 62	1,69	0,66	0,40	0,44
14 15 sept. 62	1,55	0,95	0,61	0,43
7 8 déc. 62	0,84	0,42	0,51	0,44

II - VARIATIONS SAISONNIERES DE LA VAPEUR D'EAU -

Comme nous l'avons montré sur la figure 24 du paragraphe précédent, les résultats obtenus montrent que l'épaisseur d'eau condensable varie avec la saison. Nous avons trouvé une valeur maximale pour les mois d'été et une valeur minimale pour décembre. La figure 26 montre d'après nos résultats la variation saisonnière de l'épaisseur d'eau condensable au cours de l'année 1962.

Il faut noter que les valeurs données ne sont pas des valeurs moyennes mais ce sont les maxima de l'épaisseur d'eau condensable pour les jours de beau temps où les mesures ont été effectuées, ce qui donne un rapport du minimum au maximum de l'ordre de 3/10 et une moyenne annuelle de 1,40 centimètres.

Comparons maintenant les résultats des variations diurnes et saisonnières

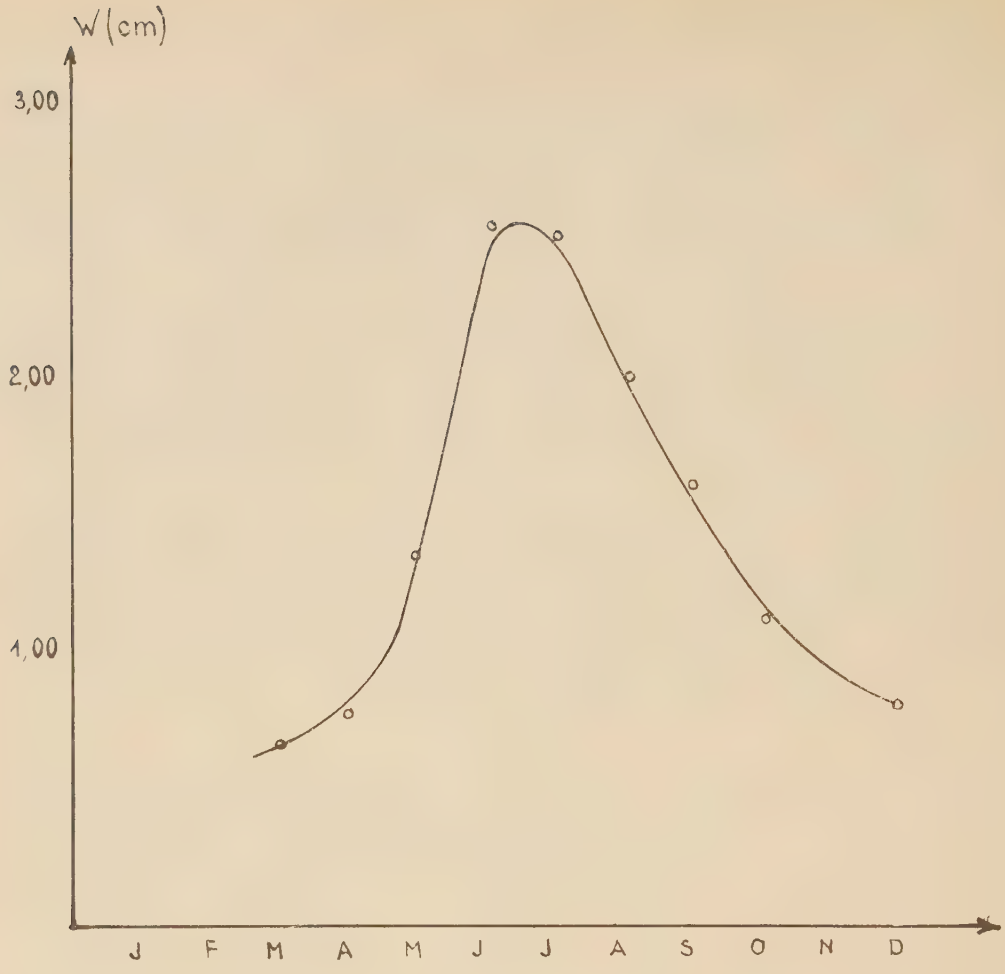

Fig. 26

avec les résultats obtenus par d'autres auteurs. Les résultats obtenus par [50], [51] et [52] ne sont pas concordants. Lejay en effectuant les mesures à l'observatoire de Zi-Ka-Wei a constaté que les variations de l'épaisseur d'eau condensable sont momentanées et les fluctuations pendant l'été beaucoup plus chaotiques et considérables que pendant l'hiver. Par exemple il a trouvé un maximum pendant l'été avec une amplitude entre 3 et 4 centimètres et un minimum en hiver de 0,5 centimètre.

Lejay a constaté également une régularité des valeurs pendant l'hiver ; enfin, il n'a pas constaté en général de variation diurne, tandis que les mesures effectuées par Gadre ont montré quelques fois une augmentation de l'épaisseur d'eau condensable au début de l'après-midi en été tandis que pour les autres mois, il a observé un maximum pendant la matinée.

Les résultats obtenus pour la variation saisonnière concordent avec ceux de Lejay, Bannon et Steele. Gadre constate aussi un maximum au mois de juin et juillet (3,97 cm) et un minimum en décembre (0,46 cm). A. et E. Vassy ont obtenu avec l'appareil à lecture directe une variation régulière pour les jours où la situation de l'atmosphère est stable. Bannon et Steele par la méthode d'intégration ont constaté que l'épaisseur d'eau condensable varie non seulement avec la saison mais également avec la latitude. Il faut noter que les travaux de ce dernier ont un caractère statistique, et d'autre part, on ne doit

pas oublier la situation géographique dans laquelle les mesures ont été faites ; bien entendu, les mesures et les résultats obtenus seront en accord avec la variation saisonnière qui dépend elle-même de l'inclinaison du rayonnement du Soleil. Donc, il est normal qu'apparaisse une relation entre la température et l'épaisseur d'eau condensable.

III - COMPARAISON DE L'EPAISSEUR D'EAU CONDENSABLE AVEC LA TEMPERATURE AU NIVEAU DU SOL -

Dans le paragraphe précédent, en comparant les rapports du minimum au maximum de l'épaisseur d'eau observée au cours d'une journée et les rapports du minimum au maximum de la température, nous avons remarqué qu'il doit exister une relation entre ces deux variables de l'atmosphère. Etudions tout d'abord les variations journalières de ces paramètres, en comparant les variations de la vapeur d'eau atmosphérique et de la température au cours du temps (figure 27).

On voit que la variation de l'épaisseur d'eau a la même allure que celle de la température au niveau du sol. Le maximum et le minimum observés pour les deux sont bien concordants dans le temps. On observe la même corrélation entre les variations annuelles de la quantité d'eau condensable et celle de la température (figure 28).

Connaissant la quantité W de vapeur d'eau condensable et la température au niveau du sol en fonction du temps, on peut éliminer la variable temporelle et tracer une courbe donnant la vapeur d'eau en fonction de la température au niveau du sol (figure 29).

On constate que la majeure partie des points se trouve approximativement sur une courbe ayant une allure croissante ; en revanche, un certain nombre de points se trouvent situés de part et d'autre, avec quelques fois de grands écarts, avec cette courbe. Nous allons essayer d'expliquer l'allure de cette variation ainsi que les distributions des points situés en dehors de cette courbe.

On part de la formule fondamentale donnant la quantité de vapeur d'eau condensable :

$$W = \int_0^{h_1} \rho_e \, dh$$

où ρ_e désigne la quantité absolue de vapeur d'eau, dh un élément de l'altitude et h_1 la limite supérieure pour laquelle il n'y a pratiquement plus de vapeur d'eau. Nous savons d'autre part que par définition :

$$\rho_e = \rho_{es} \cdot U$$

ρ_{es} étant une fonction de la température T.

Pour obtenir une explication qualitative, on peut se contenter d'une loi approximative donnant la variation de T en fonction de l'altitude. Si l'on prend une loi de la forme :

$$T = T_o \, e^{-\gamma h} \qquad (19)$$

où T_o est la température au niveau du sol, nous savons qu'après une certaine décroissance, la température croît à nouveau à partir d'une altitude déterminée h ; or à cette altitude, il n'existe pratiquement plus de vapeur d'eau. Mais on peut considérer qu'en raison du décrément logarithmique, cette altitude donne un argument de l'exponentielle, tel que l'on puisse prendre $h_1 \neq \infty$. Si l'on fait le changement de variable correspondant à T, on trouve pour la quantité de vapeur d'eau condensable :

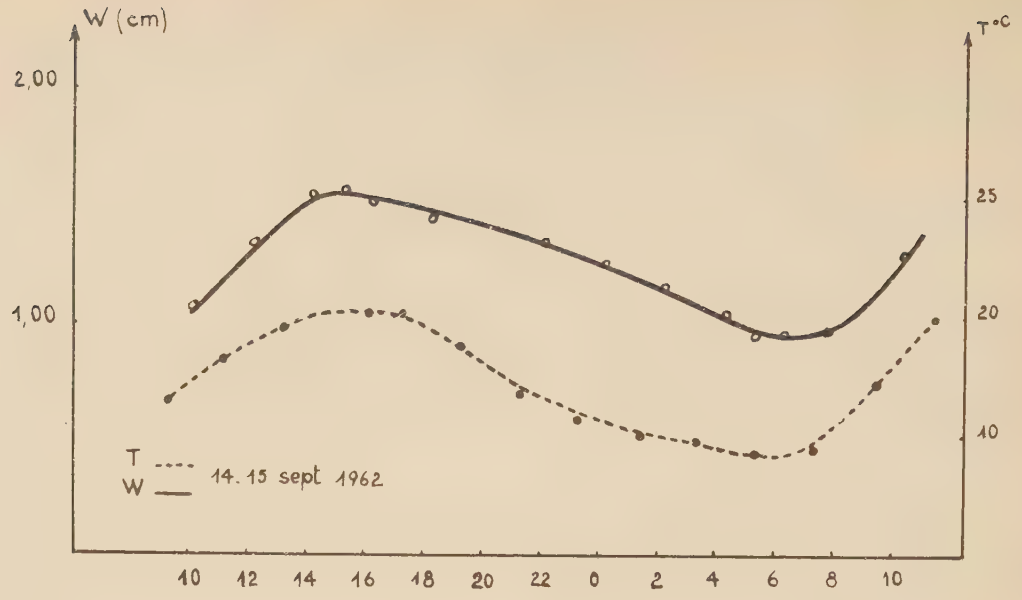
W (cm)
T°C
2,00
1,00
25
20
10
T
W
14. 15 sept 1962
10 12 14 16 18 20 22 0 2 4 6 8 10

Fig. 27

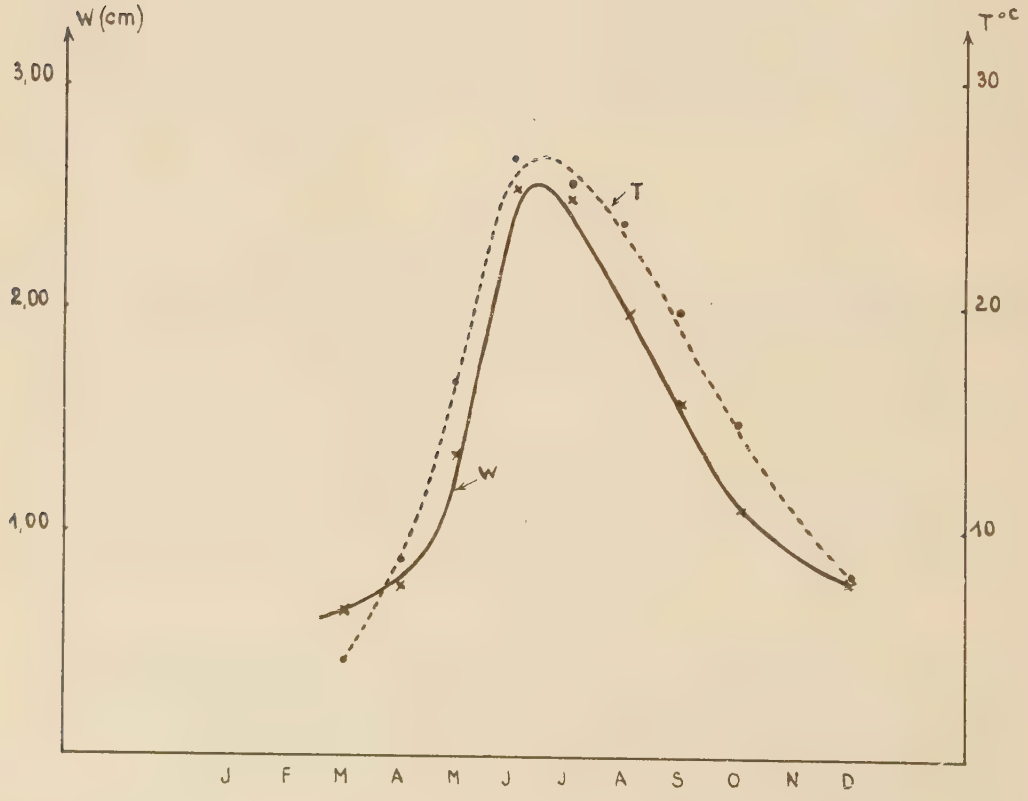
W (cm)
T°C
3,00
2,00
1,00
30
20
10
T
W
J F M A M J J A S O N D

Fig. 28

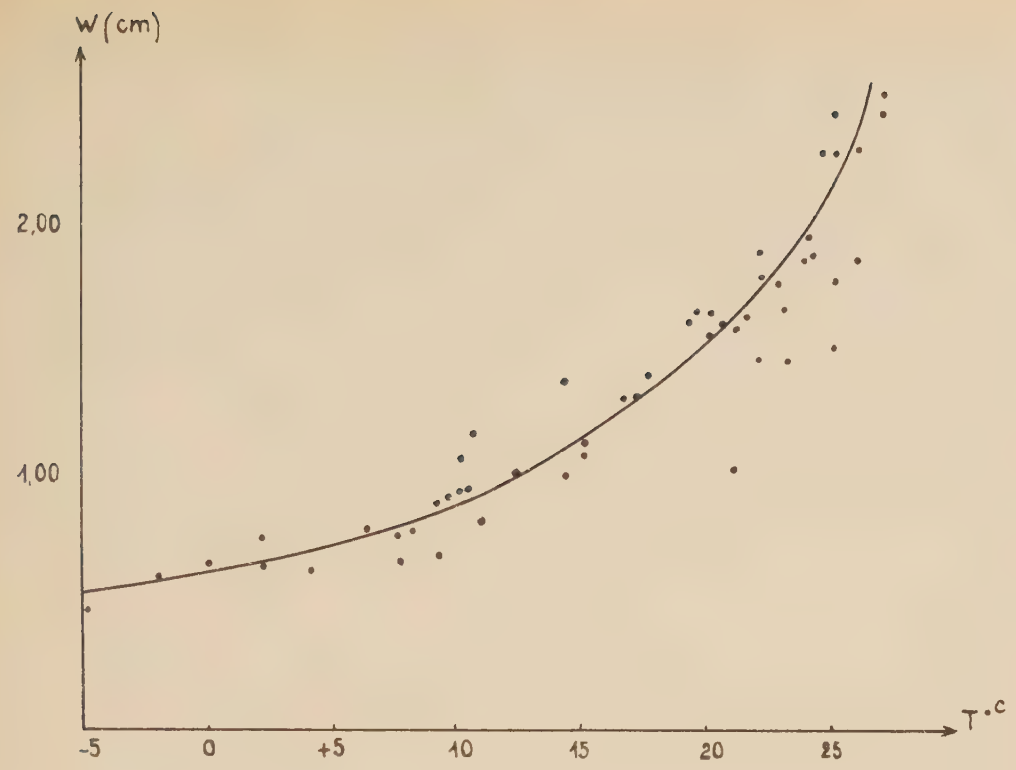

Fig. 29

$$W = \frac{1}{\gamma} \int_{o}^{T_o} \rho_{es}\,(T).\, U\ (T)\, \frac{dT}{T} \qquad (20)$$

On sait que ρ_{es} est une fonction croissante de la température et U (T) une fonction de la température (donc de l'altitude) mais dont la valeur varie avec les états atmosphériques. Il faut donc remplacer U (T) par U_n (T), n désignant le nième état atmosphérique. La figure 30 donne l'allure générale de

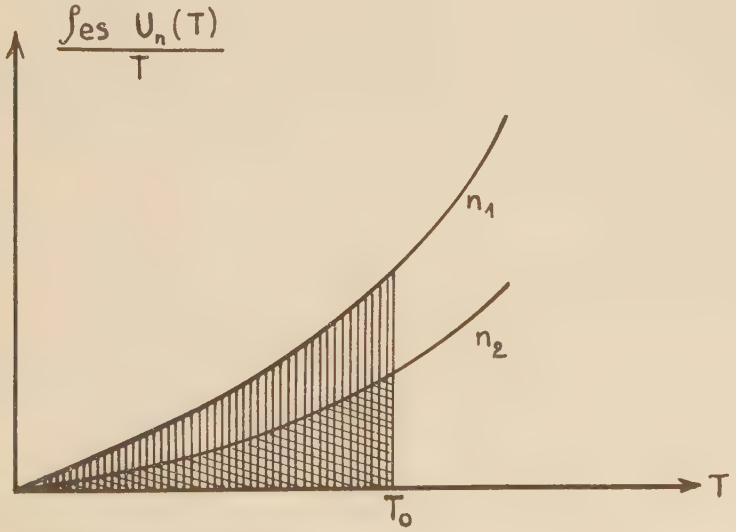

Fig. 30

la fonction sous le signe somme. On voit que l'aire comprise entre cette courbe et l'axe des T est croissante, mais ceci est valable pour le nième état atmosphérique. Donc pour n'importe quel état atmosphérique, nous aurons un faisceau de courbes intégrales correspondant aux différentes formes de U ; mais de toute manière, on obtient des courbes croissantes.

La distribution répétée de points autour d'une courbe signifie ici que la majorité des mesures ont été faites par atmosphère calme, donc pour un état atmosphérique à caractéristiques stables. Ainsi, si l'on faisait toujours les observations pour un état atmosphérique bien déterminé, la thermodynamique des systèmes fermés nous permettrait de prévoir la quantité de vapeur d'eau par la seule connaissance de la température au niveau du sol. Mais, dans l'atmosphère normale nous n'avons pas toujours à faire à des transformations adiabatiques ; pour une certaine température au niveau du sol, les échanges extérieurs influent sur la quantité de vapeur d'eau condensable et l'on peut trouver ainsi plusieurs valeurs distribuées de façon aléatoire.

Récemment H. Papée [55], en utilisant les résultats des sondages aérologiques obtenus dans 28 stations pour un cycle de 11 ans, a constaté qu'il existe une dépendance linéaire entre les moyennes saisonnières et annuelles de la température enregistrée au niveau du sol et les moyennes annuelles et saisonnières de l'épaisseur d'eau condensable existant dans la totalité de l'atmosphère.

H. Papée, en acceptant que la répartition verticale de l'épaisseur d'eau condensable ait une allure exponentielle, donne une formule ayant relié l'épaisseur d'eau condensable à la température enregistrée au niveau du sol. En utilisant les valeurs moyennes saisonnières de l'épaisseur d'eau condensable correspondant aux valeurs moyennes saisonnières de la température observée au niveau du sol, il calcule les différents coefficients utilisés et arrive à évaluer la quantité totale de vapeur d'eau dans l'atmosphère avec la seule connaissance de la température. Les résultats obtenus par la formule et les données des sondages présentent un écart moyen de 20,9 % [56].

Pour appliquer la formule en utilisant les différents coefficients correctifs, on aboutit à différentes valeurs du coefficient correctif correspondant aux différentes saisons, ce qui ramène les écarts à une valeur moyenne de 10 % environ [57].

Nous avons montré que pour une même température enregistrée au niveau du sol, on peut avoir différentes valeurs de l'épaisseur d'eau condensable qui ne concordent pas avec les moyennes saisonnières, aussi l'utilisation des coefficients obtenus d'après les moyennes annuelles et saisonnières de la température et l'épaisseur d'eau condensable est douteuse.

Il est évident que les écarts obtenus entre les résultats de sondages et les calculs basés sur les moyennes saisonnières de l'épaisseur d'eau condensable et la température T_o son dûs à la dispersion des valeurs de la quantité de vapeur d'eau pour une même température. On note une parfaite concordance entre ces écarts et la dispersion que nous avons enregistrée.

IV - MECANISME DE LA VARIATION DE LA QUANTITE DE VAPEUR D'EAU DANS L'ATMOSPHERE -

D'après les résultats exposés précédemment, voyons quel est le mécanisme de ces variations. Dans toutes les mesures on constate deux phénomènes :

1/ une augmentation de l'épaisseur d'eau condensable ;

2/ une diminution de celle-ci.

Pour l'augmentation de la quantité de la vapeur d'eau deux processus interviennent : l'évaporation de l'eau et des gouttelettes existant au sol ou dans

l'air et l'influence des masses d'air extérieures (air humide, etc.). En ce qui concerne la diminution de l'épaisseur d'eau condensable en plus de l'influence des masses d'air extérieures la condensation de la vapeur d'eau joue un rôle capital. On sait que cette condensation ne peut se produire qu'aux températures où l'équilibre entre la phase liquide et la phase vapeur est possible ; d'après Dessens [58] Woodcock [59] Junge [60] et Facy [61] on sait que la condensation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère est grandement facilitée par la présence de particules hygroscopiques dites noyaux de condensation. Considérons une particule d'air humide mais non saturé, la condensation ne pourra apparaître que si la pression partielle de la vapeur d'eau f devient égale à la pression saturante F. Pour obtenir cette égalité, ou bien il faut que f augmente et pour cela le volume doit diminuer à température constante, ou bien F diminue, ce qui correspond à une diminution de la température à volume constant. En général avec les résultats précédents et les résultats concernant la structure verticale de l'atmosphère [62] dans la plupart des cas la condensation est la conséquence du refroidissement de l'air ; ce refroidissement peut provenir, soit du contact avec une surface froide, soit du mélange de deux masses d'air de températures différentes et enfin du refroidissement par détente adiabatique d'une masse d'air.

Le premier cas de refroidissement ne se réalise que par le contact entre le sol et l'air qui le surmonte. La condensation, lorsqu'elle se manifeste reste localisée à la surface du sol. Ce phénomène se produit lorsque la température superficielle du sol s'abaisse fortement par son propre rayonnement : la quantité de vapeur condensée dépend de la température du sol, de ρ_e dans l'air, ainsi que de la masse d'air entrant en contact avec la surface du sol.

En ce qui concerne le mélange de deux masses d'air à différentes températures, le mélange de deux particules ne produit qu'une faible condensation ; enfin le refroidissement par détente adiabatique est très important. Dans l'atmosphère beaucoup de transformations sont tellement rapides que les gains et les pertes de chaleur par conductibilité, rayonnement et mélange peuvent être négligeables, ces transformations qui obéissent ainsi à la loi adiabatique ($dQ = 0$) ont une importance capitale au point de vue de la variation de l'épaisseur d'eau condensable dans l'atmosphère. Lorsque la particule en ascension adiabatique dépasse le niveau de condensation (égalité de f avec F) elle continue à se refroidir et elle se condense.

Ces différents cas permettent à la pression partielle de vapeur d'eau f, d'égaler la pression de vapeur F à la saturation et provoquent la condensation de la vapeur d'eau existant dans l'atmosphère.

Pour cela nous avons comparé les variations de la pression partielle de la vapeur d'eau au niveau du sol avec les variations de la quantité de vapeur d'eau au cours du temps : nous montrons à titre d'exemple celles du 11-12 août 1962, le tableau 9 donne les différentes valeurs de W (quantité de vapeur d'eau) et f (pression partielle de la vapeur d'eau) au cours du temps.

Tableau IX

Heures T. L	W (cm)	f (mb)	Heures T. L	W (cm)	f (mb)	Heures T. L	W (cm)	f (mb)
10		13,5	16	2,30	15,4	22	1,50	20,1
11		14,8	17	2,28	15,4	23	1,49	18,3
12	1,91	16,4	18	2,15	16,6	0	1,37	16,2
13	2,33	17,5	19	1,91	19,8	1	1,30	14,7
14	2,40	16,9	20		21,2	2		13,8
15	2,33	16,8	21		21,7	3		13,3

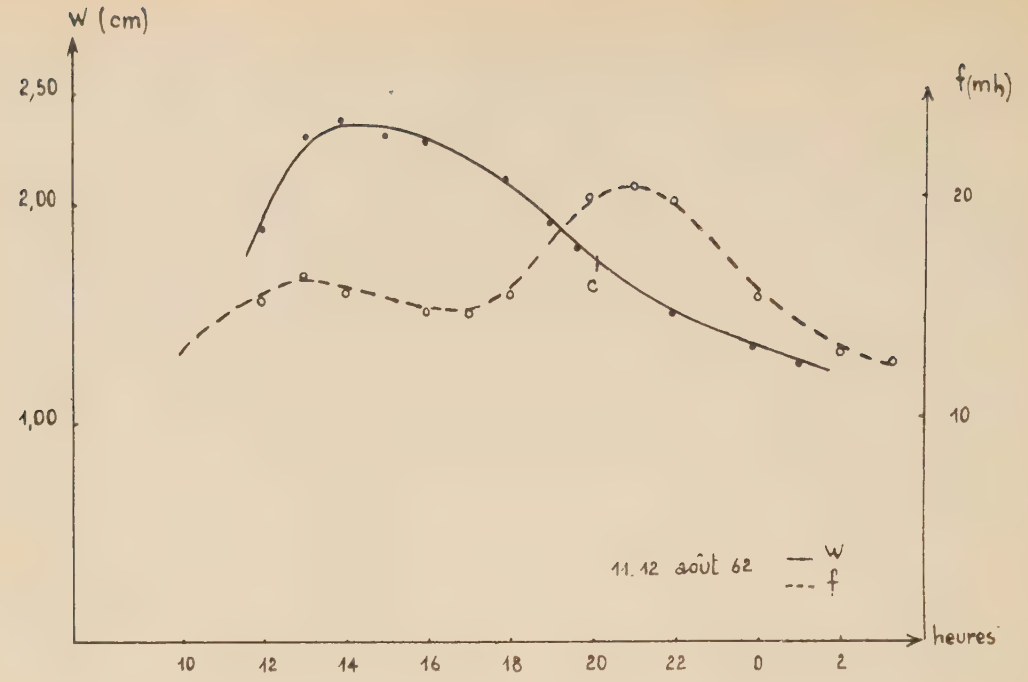

Fig. 31

On voit sur la figure 31 qu'au début de la journée, avec l'augmentation de la quantité de vapeur, f augmente puis subit une faible variation au milieu de la journée jusqu'au moment où l'épaisseur d'eau condensable commençant à diminuer, la pression partielle de la vapeur d'eau augmente très rapidement et ceci jusqu'aux environs du coucher du Soleil ; au cours de la nuit f atteint un maximum puis descend régulièrement jusqu'au lever du Soleil.

Ces variations ont été observées dans toutes les mesures faites sur une situation atmosphérique stable, ce qui correspond bien au cas du refroidissement de l'air et de la condensation de la vapeur d'eau.

On voit qu'au moment du coucher du Soleil la diminution de la vapeur d'eau est rapide tandis que le taux de condensation est très élevé : c'est cette variation de l'épaisseur d'eau condensable au coucher du Soleil et durant la nuit qui modifie la situation des très basses couches de l'atmosphère, c'est elle qui est la cause des variations de l'indice de réfraction de l'air [63] et des changements de l'intensité des signaux sur ondes courtes et ultra-courtes (hyperfréquence) dans la propagation troposphérique [64] que l'on observe au coucher du Soleil et durant la nuit.

D'après le mécanisme des variations de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, nous allons expliquer maintenant pour quelles raisons dans le cas d'une atmosphère calme et non perturbée l'allure générale de la variation est semblable à celle de la figure 25.

On sait que le rayonnement solaire, après avoir traversé les couches atmosphériques rencontre la Terre et est absorbé par la surface de celle-ci ; comme la conductibilité calorifique et la chaleur spécifique de la Terre sont faibles, celle-ci s'échauffe sur une très faible épaisseur et par conséquent réchauffe l'air qui se trouve à son contact : lorsque sa température est suffisante, celui-ci s'élève en se refroidissant et son ascension s'arrête lorsque sa température est en équilibre avec le milieu ambiant. La masse d'air déplacée par la précédente descend au sol, s'échauffe à son tour et le même

cycle se reproduit. La température du sol et l'épaisseur d'eau condensable augmentent à mesure que le Soleil s'élève au-dessus de l'horizon : elles présentent un maximum au début de l'après-midi, puis avec l'inclinaison du Soleil l'air se refroidit et comme nous l'avons montré précédemment la condensation de la vapeur d'eau commence à se manifester : au début, la condensation est faible tandis qu'aux environs du coucher du Soleil et peu après elle devient appréciable ; la diminution de la vapeur d'eau se manifeste continuellement jusqu'au moment du lever du Soleil où elle atteint un minimum, puis elle augmente à nouveau.

V - NOMBRE DE GOUTTELETTES DUES A LA VARIATION DE L'EPAISSEUR D'EAU CONDENSABLE -

Comme nous l'avons montré, on constate qu'à partir d'un certain moment "au milieu de l'après-midi", la quantité de vapeur d'eau diminue régulièrement. Si l'on admet que cette diminution est due à la condensation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, la vapeur d'eau condensée sur les noyaux de condensation provoque la formation de gouttelettes d'eau de différentes dimensions, le nombre de gouttelettes et leurs dimensions dépendent à la fois du nombre de noyaux, de l'état hygrométrique et de la durée de la condensation [65].

D'après J. Bricard [65], on sait que si l'humidité relative croît et dépasse certaines limites (78 %), on trouve des gouttelettes d'eau très actives qui se développent et forment des gouttelettes nuageuses. Nos mesures ont été faites par beau temps et avec un ciel dégagé ; aussi l'humidité relative étant très faible au cours de la journée, c'est seulement aux environs du coucher du Soleil et durant la nuit que l'humidité relative enregistrée au niveau du sol augmente et dépasse les limites ci-dessus.

On sait que la répartition verticale de l'humidité relative en l'absence des nuages diminue rapidement avec l'altitude ; on admet dans le cas de nos mesures que le développement des rayons des gouttelettes d'eau n'intervient pas. Comme toutes les gouttelettes formées ont des dimensions différentes, il est plus simple de choisir un rayon moyen et de déterminer le nombre de gouttelettes d'eau formé. Nous admettons d'après les données de J. Bricard [65] pour les gouttelettes formées, un rayon moyen de $\bar{r} = 5\,\mu$; calculons le nombre de gouttelettes formées au cours du temps. Supposons que pour un instant donné T_o, le taux de la condensation et de l'évaporation sont égaux (l'influence des masses d'air extérieures est négligeable). Soit N_o le nombre de gouttelettes d'eau existant dans l'unité de volume ; après un temps $T_o + \Delta T$ on a le nombre de gouttelettes $N_o + \Delta N$ suivant le sens de la variation. En admettant que la masse spécifique de l'eau est égale à l'unité, la masse des gouttelettes d'eau d'un rayon moyen de $\bar{r} = 5\,\mu$ sera :

$$m = \rho V = \frac{4}{3}\,\pi\,(\bar{r})^3 \simeq 5{,}25 \times 10^{-10}\ \text{gr} \qquad (21)$$

Connaissant le taux de la vapeur d'eau condensée, on calcule le nombre de gouttelettes formées. Le tableau (10) donne le nombre de gouttelettes calculé pour deux journées (11-12 août 1962, 14-15 septembre).

On voit sur la figure 32 que le nombre de gouttelettes augmente au cours du temps (la nuit) et atteint une valeur maximum vers le lever du Soleil, puis diminue rapidement quand la quantité de vapeur d'eau augmente. Pour le 11 août 1962 les valeurs obtenues sont plus élevées que pour le 14 septembre 1962 : la condensation de la vapeur d'eau et l'augmentation du nombre de gouttelettes d'eau provoquent une formation nuageuse le 11 août 1962 et la mesure est difficile après 23 heures, tandis que les minces couches nuageuses formées le 14 septembre 1962 ne sont pas gênantes pour les mesures que nous avons pu poursuivre jusqu'au lendemain.

Tableau X

Heures	11⟶12 août		14⟶15 sept.		Heures	11⟶12 août		14⟶15 sept.	
	La masse d'eau condensée gr. 10^{-6}	ΔN	La masse d'eau condensée gr. 10^{-6}	ΔN		La masse d'eau condensée gr. 10^{-6}	ΔN	La masse d'eau condensée gr. 10^{-6}	ΔN
14					0	1,11	2 109	0,30	570
15	0,07	133			1	1,18	2 242	0,35	665
16	0,10	190	0,06	114	2			0,39	741
17	0,20	380	0,10	190	3			0,45	855
18	0,33	627	0,13	247	4			0,50	950
19	0,57	1 083	0,13	247	5			0,60	1 140
20	0,68	1 292	0,15	285	6			0,58	1 102
21	0,83	1 577	0,17	323	7			0,54	1 026
22	0,98	1 862	0,19	361	8			0,55	1 045
23	1,00	1 900	0,25	475	9			0,49	931
					10			0,27	513

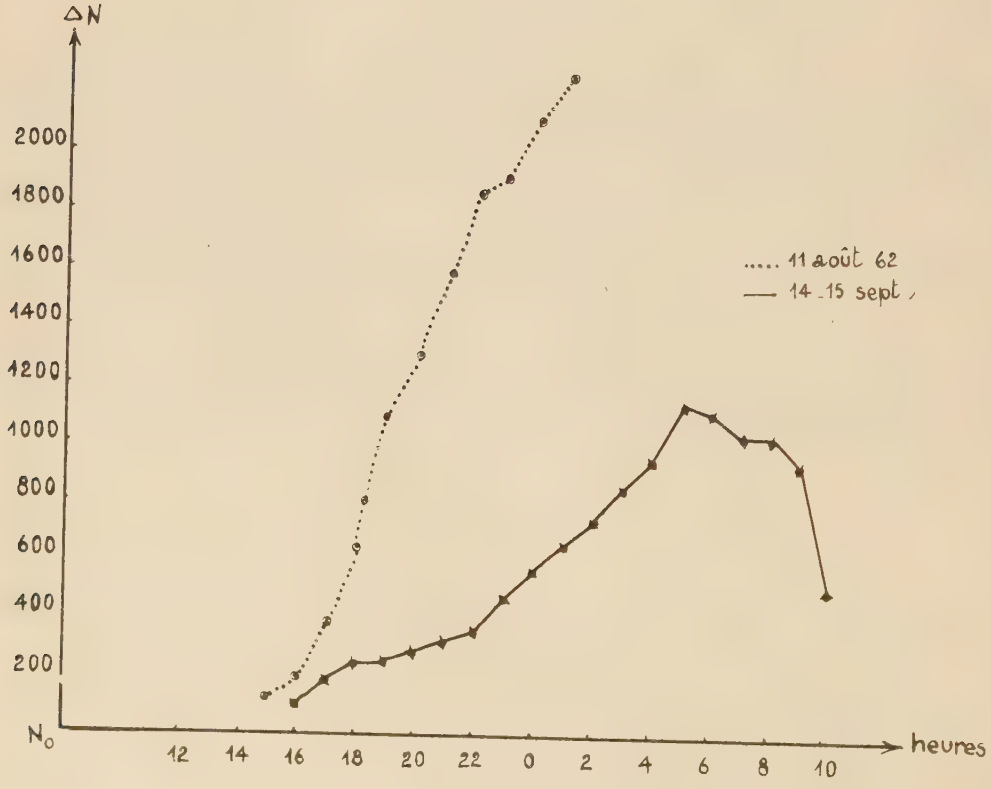

Fig. 32

VI - CONCLUSIONS -

On peut résumer de la façon suivante les résultats principaux des recherches qui viennent d'être exposés.

1/ Nous avons réalisé un appareil basé sur les propriétés absorbantes de la vapeur d'eau, capable de fonctionner avec le Soleil ou la Lune comme source d'énergie, le maximum de l'erreur commise compte tenu de l'étalonnage est inférieur à 6 %.

2/ L'étude des variations journalières et annuelles de l'amplitude de l'épaisseur d'eau condensable montre que :

a) Dans le cas d'une atmosphère perturbée et influencée par les masses d'air extérieures, l'amplitude de la quantité d'eau condensable subit une fluctuation irrégulière et sa valeur dépend de l'humidité de l'air, de la température du milieu, de la vitesse du vent et de sa direction.

b) Dans le cas d'une atmosphère calme et non influencée par les masses d'air extérieures, les variations de l'amplitude de la vapeur d'eau au cours du temps sont régulières, elles confirment l'augmentation de l'épaisseur d'eau condensable au début de l'après-midi, le maximum se situant entre 13 et 16 heures suivant la saison, elles montrent l'existence d'une diminution régulière de cette quantité, la diminution s'amorçant au milieu de l'après-midi (l'augmentation de taux de condensation de la vapeur d'eau) et se poursuivant durant la nuit avec un minimum à peu près au moment du lever du Soleil ; le rapport du minimum au maximum de ces amplitudes est en moyenne de l'ordre de 54 %.

3/ Nous avons constaté une variation saisonnière pour l'amplitude de l'épaisseur d'eau condensable.

a) Pour les variations saisonnières diurnes, le maximum de l'amplitude est observé en été : il est de l'ordre de 2,66 cm et le minimum est en hiver : il est de l'ordre de 0,80 cm.

b) Pour les variations saisonnières nocturnes, le maximum de l'amplitude (en été) est de l'ordre de 1,45 cm et le minimum (en hiver) de l'ordre de 0,42 cm.

4/ Nous avons observé une nette corrélation entre les variations de l'épaisseur d'eau condensable et la température au niveau du sol.

5/ La diminution de l'épaisseur d'eau condensable due à la condensation provoque l'augmentation du nombre des gouttelettes d'eau existant dans l'atmosphère et dans certains cas détermine la formation de minces couches nuageuses.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Ch. MAURIN - "Etude Pratique des Rayonnements Solaire, Atmosphérique et Terrestre", Gauthier Villars, Paris 1937, p. 77.

[2] E. VASSY - "Physique de l'Atmosphère", Gauthier Villars, Paris 1956, 1, p. 49.

[3] E. KEER - "Propagation of Short Radio Waves", Mc Graw-Hill Book company, I N C London 1951, p. 191.

[4] R. RIGAL - "Les Hyperfréquences", Eyrolles, Paris 1950, p. 218.

[5] L. DUFOUR - "Thermodynamique de la Condensation dans l'Atmosphère", Lavenir, Bruxelles 1959.

[6] E. H. GOWAN - Quart. J. R. Met. Soc. 1936, 62 supp., p. 34.

[7] F. E. FOWLE - Astrophys. J. R., 1912, 35, p. 149.

[8] G. A. PROKOFIEV, K. D. GODUNOV et BIRNBAUM - "Nature", 1934, 133, p. 918.

[9] J. HANN - Zeit. Oster. Ges. F. Met., 1874, 9, p. 193.

[10] F. E. FOWLE - Astrophys. J., 1913, 37, p. 859.

[11] F. E. FOWLE - Astrophys. J., 1915, 42, p. 394.

[12] A. et E. VASSY - C.R. Acad. Sc., 1940, 211, p. 158.

[13] N.B. FOSTER and W. FOSKETTE - J.O.S.A., 1945, 35, p. 601.

[14] A. et E. VASSY - Scient. Proc. Inter. Ass. of Mét., Butterworths Scientific Publications, London 1954, p. 215.

[15] M. ALAVI-NEJAD - C.R. Acad. Sc., 1962, 254, p. 1662.

[16] A. ARIAN - "Diplome d'Etudes Supérieures", Paris 1961, p. 16.

[17] Ch. FABRY - "Introduction générale à la Photométrie" Revue d'Optique, Paris 1927, p. 39.

[18] P. BOUGUER - "Essai d'Optique sur la graduation de la lumière" Gauthier Villars, 1921.

[19] Ch. FABRY et H. BUISSON - C.R. Acad. Sc., 1931, p. 457.

[20] E. VASSY - "Cours de Physique de l'Atmosphère, Faculté des Sciences de Paris", 1962.

[21] A. et E. VASSY - "La Météorologie", 1943, p. 14.

[22] J. CABANNES - "La Diffusion Moléculaire de la Lumière", Presses Universitaires, Paris 1929, 16.

[23] G. de VAUCOULEURS - Thèse, Paris, Série A, n° 457, 1950.

[24] N. ASTOIN - Thèse, Paris, Série A, n° 2990, 1957.

[25] J. ROULLEAU et R. TROCHON - "Météorologie Générale" Gauthier Villars, Paris 1952, 1, p. 97.

[26] J. JANSSEN - "Annales de Physique et Chimie", 1871, 24, p. 215.

[27] R. MECKE et W. BAUMANN - Zeits für Physik, 1932, 73, p. 139.

[28] A. et E. VASSY - "Publications Scientifiques et Techniques du Secrétariat d'Etat à l'Aviation". Gauthier-Villars, Paris 1941, 175, p. 10.

[29] F.E. FOWLE - Astrophys. J., 1915, 35, p. 149.

[30] G. YAMAMOTO et G. ONISHI - J. Met., 1952, 9, p. 415.

[31] J.E. Mc DONALD - J. Met., 1960, 17, p. 319.

[32] J.N. HOWARD, D.L. BURCH - J. Opt. Soc. Am., 1955, p. 46.

[33] J.C. PECKER et E. SCHATZMAN - "Astrophysique Générale" Masson, Paris 1953, p. 108.

[34] W.T. ROACH - Quart. J. of the Meteo. Royal Soc., 1961, 87, n° 373, p. 365.

[35] W.E.K. MIDDLETON - "Vision through the Atmosphere" University of Toronto Presse, Canada, 1952, p. 29, 36.

[36] G. MIE - Annalen der Physik, 1908, 25, p. 377.

[37] P. DEBYE - Annalen der Physik, 1909, 30, p. 54.

[38] J.A. STRATTON et H.G. HOUGHTON - Physical Review, 1939, 38, p. 159.

[39] H. DESSENS - Annales de Géophysique, 1947, 3, p. 78.

[40] A. ANGSTROM - Geophys. Annals, 1930, p. 130.

[41] A. KASTLER et G. BRUHAT - "Optique" Masson, Paris 1954, p. 152, 153.

[42] G. GOUDET - "Electronique Industrielle", Eyrolles, Paris, p. 327, 516.

[43] A. LALLEMAND - "Techniques générales du Laboratoire de Physique", C.N.R.S., Paris 1947, 1, p. 330.

[44] F.E. TERMAN - "Radio Engineer's Hand Book", Mc Graw-Hill Book Co. I N C London 1943, p. 918.

[45] J. VAN MEIGHEM et L. DUFOUR - "Thermodynamique de l'Atmosphère", Lavenir Bruxelles 1948, p. 23.

[46] Hand Book of Chemistry and Physics, Chimical Rubber Publishing Co Ohio (U.S.A.) 1961, p. 2486.

[47] M.F. LINK - Journal des Observateurs 1934, 17, n° 3, p. 39, 41.

[48] A. BEMPORAD - C.R. Acad. Lincei 1907, 5, p. 16.

[49] B. LEROY - Thèse Faculté des Sciences de Paris, 1963.

[50] R.P. LEJAY - La Météorologie, 1950, Janvier-mars, p. 29.

[51] K.L. GADRE - P. Inde Acad. Sc. Bangalor 1946, 23 A, p. 115.

[52] A. et E. VASSY - Journal Scientifique Météorologie 1950, 7, p. 65.

[53] J.K. BANNON et L.P. STEELE - Geophys. Mem. Met. Office 1960, p. 102.

[54] M. ALAVI-NEJAD - C.R. Acad. Sc., 1963, 256, p. 982.

[55] H. PAPEE et A. MONTEFINALE - "Geofisica Pura E Applicata" 1961/1 48, p. 215.

[56] H. PAPEE et A. MONTEFINALE - Geofisica Pura E Applicata, 1961/1, 48, p. 238.

[57] A. MONTEFINALE, T. W. ZAWIDZKI et H. PAPEE - Geofisica Pura E Applicata, 1963/1, 54, p. 194.

[58] H. DESSENS - Annales de Geophysique, Taffin-Lefort, Lille (France) 1946, 2, p. 343.

[59] A. H. WOODCOCK - J. Met., 1953, 10, p. 362.

[60] C. E. JUNG - J. Met., 1954, 11, p. 323.

[61] L. FACY - J. Scient. Met., 1950, 2, p. 7 et 1951, 3, p. 86.

[62] J. ROULLEAU et R. TROCHON - Météorologie Générale, Gauthier-Villars, Paris 1958, 2, p. 113.

[63] G. BOUDOURIS - Thèse Paris 1958, p. 99.

[64] E. VASSY - Physique de l'Atmosphère, Gauthier-Villars, Paris 1959, 2, p. 115.

[65] J. BRICARD - Physique des nuages, Presses Universitaires, Paris 1953, p. 89, 91, 97.

TABLE DES MATIÈRES

Pages

INTRODUCTION

L'épaisseur d'eau condensable 5

Chapitre I - REALISATION DE L'APPAREIL

I - Principe 7

II - Partie optique 8
1/ Choix de la région spectrale 8
2/ Héliostat et sélénostat 12
3/ Sténopé 12
4/ Lentilles 12
5/ Filtres affaiblissants 14
6/ Filtres interférentiels 15
7/ Coin photométrique 16
8/ Récepteur de mesure 17

III - Partie électronique 17
1/ Caractéristiques du photomultiplicateur 17
2/ Alimentation 18
3/ Préamplificateur sélectif 18
a) amplification 19
b) le filtre sélectif 19
4/ Amplificateur de mesure 20
5/ Dispositif électronique de référence 21
a) Source de lumière 23
b) Capteur électronique 23
c) Amplificateur de signaux auxiliaires 23
d) Système stabilisateur de tension 23
6/ Discriminateur de phase et son fonctionnement 23
7/ Liaison relais-moteur 25
8/ Stabilité et fidélité de la partie électronique 26
a) Stabilité de la fréquence de modulation 26
b) Influence des variations du niveau d'énergie lumineuse 26

IV - Mise en station de l'appareil et précautions nécessaires ... 28
1/ Mise en station de l'appareil 28
2/ Précautions nécessaires 28
Mesures diurnes
a) Lumière ambiante 28
b) échauffement de la partie électronique 28
Mesures nocturnes
a) Condensation de la vapeur d'eau 28
b) Contrôle du réglage du sélénostat 28

Pages

Chapitre II - ETALONNAGE

I - Méthodes d'étalonnage 29
1/ Etalonnage en système fermé 29
2/ Etalonnage en système ouvert 29

II - Méthode de calcul de l'épaisseur d'eau condensable 30

III - Courbe d'étalonnage 31

IV - Comparaison des résultats obtenus 33

V - Précision de l'appareil 34
1/ Erreur sur la masse d'air 35
2/ Erreur sur l'enregistrement 35

Chapitre III - ETUDE DES VARIATIONS DE L'EPAISSEUR D'EAU CONDENSABLE 39

I - Variation journalière de l'épaisseur d'eau condensable ... 40
Variations régulières 41
Variations de l'épaisseur d'eau condensable pour un cycle de 24 heures 42

II - Variations saisonnières de la vapeur d'eau 45

III - Comparaison de l'épaisseur d'eau condensable avec la température au niveau du sol 47

IV - Mécanisme de la variation de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère 50

V - Nombre de gouttelettes dues à la variation de l'épaisseur d'eau condensable..... 53

VI - Conclusion 55

BIBLIOGRAPHIE 57

IMP. LOUIS-JEAN – GAP
Dépôt légal n° 237 – 1964